



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



DIPLOMSKI RAD

Mentori

prof.dr.sc. Mladen Šercer

prof.dr.sc. Đurđica Španiček

Luka Ribarić

Zagreb, 2009.

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorima prof.dr.sc. Mladenu Šerceru i prof.dr.sc. Đurđici Španiček na pomoći i korisnim savjetima koje su mi pružili tijekom izrade ovog rada.

Zahvalio bih se dipl. ing. Damiru Ruljančiću, direktoru poduzeća „Board Guardian“ i osoblju poduzeća bez čije pomoći i savjeta ispitivanja ne bi bila provedena.

Također želio bih se zahvaliti laborantima Laboratorija za nemetale Božidaru Bušetinčanu i Vesni Torjanac na pomoći kod provođenja ispitivanja.

Zahvalio bih se osoblju Katedre za preradu polimera, asistenticama mr. sc. Maji Rujnić Sokele i posebno dipl. ing. Ani Pilipović koje su mi pametnim savjetima pomagale kod svakog koraka izrade ovog rada.

Zahvalio bi se obitelji koja je bila uz mene tijekom čitavog studija.

SAŽETAK

Kompoziti su relativno nova skupina materijala koja ima brojne prednosti pred uobičajenim konstrukcijskim materijalima. Niže su cijene, lagane prerađljivosti, mogućnosti prerade konvencionalnim preradbenim postupcima, pogodnosti masovnoj proizvodnji i mogućnosti recikliranja. Sve više zamjenjuju konvencionalne materijale u mnogim granama industrije poput automobilske, zrakoplovne i građevinske industrije.

U prvom dijelu rada dan je pregled kompozitnih materijala te su detaljnije obrađeni polimerni kompoziti i uz njih povezani postupci prerade, budući da su oni najraširenija vrsta kompozita. U drugom dijelu rada proveden je niz ispitivanja mehaničkih svojstava kompozita s različitim plošnim masama staklene tkanine odnosno različitim brojem slojeva tkanine. Cilj rada je utvrditi utjecaj broja slojeva tkanine, odnosno gustoće vlakana na mehanička svojstva kompozita.

IZJAVA

Izjavljujem da sam ovaj rad radio samostalno, uz korištenje navedene literature i konzultacija.

Luka Ribarić

SADRŽAJ:

POPIS SLIKA	IV
POPIS TABLICA	VII
POPIS OZNAKA I MJERNIH JEDINICA FIZIKALNIH VELIČINA	VIII
POPIS KRATICA	IX
1. UVOD	1
2. OPĆENITO O KOMPOZITIMA	2
3. POLIMERNI KOMPOZITI	5
3.1. Matrica	6
3.1.1. Polimeri za izradu matrica	6
3.1.1.1. Duromeri	6
3.1.1.1.1. Epoksidna smola	7
3.1.1.1.2. Poliester (nezasićeni)	9
3.1.1.1.3. Poliimidi i bismaleimidi	10
3.1.1.1.4. Fenoli	10
3.1.1.1.5. Poliuretani (PUR)	11
3.1.1.1.6. Policijanati	11
3.1.1.2. Plastomerne matrice	11
3.1.1.2.1. Polietilen (PE) i polipropilen (PP)	12
3.1.1.2.2. Poli(vinil-klorid) (PVC)	12
3.1.1.2.3. Polistiren (PS)	12
3.1.1.2.4. Poliesteri	12
3.1.1.2.5. Poli(metil-metakrilat) (PMMA)	13
3.1.1.2.6. Poliacetal (POM)	13
3.1.1.2.7. Polikarbonat (PC)	13
3.1.1.2.8. Poliamid (PA)	14
3.1.1.2.9. Poli(aril-eter)	14
3.1.1.2.10. Poliimid (PI)	14
3.1.1.2.11. Poli(fenilen-sulfid) (PPS)	15
3.2. Oblici ojačavala	15
3.2.1. Ojačavala	17
3.2.1.1. Ojačavala u obliku čestica	17

3.2.1.2. Ojačavala u obliku vlakana	17
3.2.1.2.1. Staklena vlakna	18
3.2.1.2.2. Ugljikova vlakna	19
3.2.1.2.3. Aramidna vlakna	19
3.2.1.2.4. Borna vlakna	20
3.2.1.2.5. Keramička vlakna	20
3.2.1.2.6. Metalna vlakna	21
3.2.1.2.7. Drvena vlakna	21
3.2.1.3. Oblici vlakana	21
4. PRERADA POLIMERNIH KOMPOZITA	26
4.1. Načini objedinjavanja matrice i ojačavala	26
4.1.1. Smjese za kalupljenje	26
4.1.1.1. Pločasti osmoljeni matovi	26
4.1.1.2. Vlaknasti preprezi	28
4.1.1.3. Debelopločasti osmoljeni mat	28
4.1.2. Preprezi	28
4.2. Postupci s otvorenim kalupom	30
4.2.1. Procesi mokrog laminiranja	30
4.2.1.1. Dodirni postupak laminiranja	30
4.2.1.2. Raspršivanje	32
4.2.2. Prešanje gumenom vrećom	33
4.2.2.1. Prešanje gumenom vrećom s pomoću podtlaka	34
4.2.2.2. Prešanje gumenom vrećom s pomoću pretlaka	34
4.2.2.3. Hidroformiranje	35
4.2.3. Izravno prešanje u zatvorenom kalupu nakon mokrog laminiranja	36
4.2.4. Umreživanje	36
4.2.5. Autoklavno praoblikovanje	36
4.3. Proces i sa zatvorenim kalupom	37
4.3.1. Izravno prešanje	37
4.3.2. Posredno prešanje	38
4.3.3. Injekcijsko prešanje	39
4.4. Namotavanje filamenata	42

4.5. Pultrudiranje	47
4.5.1. Pultrudiranje duromernih kompozita	47
4.5.2. Pultrudiranje plastomernih kompozita	49
4.5.3. Ostali postupci pultrudiranja	50
4.6. Ostali postupci preradbe	52
4.6.1. Centrifugalno lijevanje	52
4.6.2. Lijevanje	52
4.6.3. Ekstrudiranje	53
4.6.4. Kontinuirano laminiranje	53
4.6.5. Drapiranje preprega	54
4.6.6. Oblikovanje valjanjem	54
5. EKSPERIMENTALNI RAD	56
5.1. Uvod	56
5.2. Upotrijebljeni materijali	56
5.3. Postupak izrade	58
5.4. Ispitivanje mehaničkih svojstava	63
5.4.1. Ispitivanje savojne čvrstoće i modula savitljivosti	63
5.4.2. Ispitivanje prividne međuslojne smične čvrstoće metodom kratke grede	69
5.4.3. Ispitivanje tvrdoće metodom utiskivanja kuglice	72
5.4.4. Određivanje masenog udjela ojačavala	74
5.4.5. Određivanje udjela šupljina u kompozitu	77
5.5. Određivanje volumnog udjela vlakana u smjeru naprezanja	79
5.6. Rasprava	82
6. ZAKLJUČAK	85
7. LITERATURA	87
8. PRILOG	89
8.1. Rezultati mjerenja savojne čvrstoće i modula savitljivosti ispitnih tijela sa staklenom tkaninom plošne mase 80 g/m^2	89
8.2. Rezultati mjerenja savojne čvrstoće i modula savitljivosti ispitnih tijela sa staklenom tkaninom plošne mase 163 g/m^2	91
8.3. Rezultati mjerenja savojne čvrstoće i modula savitljivosti ispitnih tijela sa staklenom tkaninom plošne mase 390 g/m^2	94

8.4. Mjerenje tvrdoće metodom utiskivanja kuglice promjera 5 mm

96

POPIS SLIKA

Slika 3.1. Epoksidna skupina

Slika 3.2. Kemijska struktura epoksidne smole

Slika 3.3. Načini rasporeda vlakana

Slika 3.4. Uzorci tkanja

Slika 3.5. Postupak simultnog šivanja

Slika 4.1. Proizvodnja pločastih osmoljenih matova

Slika 4.2. Postupak s impregnacijom taljevine

Slika 4.3. Koraci dodirnog postupka

Slika 4.4. Raspršivanje

Slika 4.5. Prešanje gumenom vrećom s pomoću podtlaka

Slika 4.6. Prešanje gumenom vrećom s pomoću pretlaka

Slika 4.7. Hidroformiranje

Slika 4.8. RTM postupak

Slika 4.9. Injekcijsko prešanje vlaknima ojačanih plastomernih taljevina

Slika 4.10. *Engelova* linija za injekcijsko prešanje vlaknima ojačanih plastomernih taljevina

Slika 4.11. Uzorci namotavanja

Slika 4.12. Vijčano namotavanje

Slika 4.13. Stroj za vijčano namotavanje

Slika 4.14. Pultrudiranje duromernih kompozita

Slika 4.15. Profili dobiveni pultrudiranjem

Slika 4.16. Pultrudiranje plastomernih kompozita

Slika 4.17. Proizvodi dobiveni postupkom *Pullforming*

Slika 4.18. Povlačno namotavanje

Slika 4.19. Tkanje staklenih vlakana na osovini

Slika 4.20. Postupak kontinuiranog laminiranja

Slika 4.21. Drapiranje preprega

Slika 4.22. Oblikovanje valjanjem

Slika 5.1. Kalup

Slika 5.2. Prvi sloj tkanine položen u kalup

Slika 5.3. Kalup na polovici i na kraju postupka laminiranja

Slika 5.4. Stegnuti kalup i peć

Slika 5.5. Gotove kompozitne ploče

Slika 5.6. Prva i druga serija ispitnih tijela

Slika 5.7. Ispitno tijelo na ispitnom uređaju

Slika 5.8. Izgled ispitnih tijela nakon ispitivanja

Slika 5.9. Dijagram ovisnosti savojne čvrstoće o plošnoj masi staklene tkanine

Slika 5.10. Dijagram ovisnosti modula savitljivosti o plošnoj masi staklene tkanine

Slika 5.11. Ispitno tijelo na ispitnom uređaju

Slika 5.12. Dijagram ovisnosti prividne međuslojne smične čvrstoće o plošnoj masi staklene tkanine

Slika 5.13. Ispitno tijelo postavljeno na ispitnom uređaju

Slika 5.14. Dijagram ovisnosti tvrdoće o plošnoj masi staklene tkanine i vremenu

Slika 5.15. Porculanski lončići s staklenim vlaknima

Slika 5.16. Dijagram ovisnosti masenog udjela staklenih vlakana o plošnoj masi staklene tkanine

Slika 5.17. Dijagram ovisnosti udjela šupljina o plošnoj masi staklene tkanine

Slika 5.18. Mikroskopska snimka odbruska kompozita s staklenom tkaninom plošne mase 80 g/m^2

Slika 5.19. Mikroskopska snimka odbruska kompozita s staklenom tkaninom plošne mase 163 g/m^2

Slika 5.20. Mikroskopska snimka odbruska kompozita s staklenom tkaninom plošne mase 390 g/m^2

Slika 5.21. Dijagram ovisnosti volumnog udjela vlakana raspoređenih u uzdužnom smjeru

Slika 8.1. Dijagram ovisnosti progiba o opterećenju za prvo ispitno tijelo

Slika 8.2. Dijagram ovisnosti progiba o opterećenju za drugo ispitno tijelo

Slika 8.3. Dijagram ovisnosti progiba o opterećenju za treće ispitno tijelo

Slika 8.4. Dijagram ovisnosti progiba o opterećenju za četvrto ispitno tijelo

Slika 8.5. Dijagram ovisnosti progiba o opterećenju za peto ispitno tijelo

Slika 8.6. Dijagram ovisnosti progiba o opterećenju za prvo ispitno tijelo

Slika 8.7. Dijagram ovisnosti progiba o opterećenju za drugo ispitno tijelo

Slika 8.8. Dijagram ovisnosti progiba o opterećenju za treće ispitno tijelo

Slika 8.9. Dijagram ovisnosti progiba o opterećenju za četvrto ispitno tijelo

Slika 8.10. Dijagram ovisnosti progiba o opterećenju za peto ispitno tijelo

Slika 8.11. Dijagram ovisnosti progiba o opterećenju za prvo ispitno tijelo

Slika 8.12. Dijagram ovisnosti progiba o opterećenju za drugo ispitno tijelo

Slika 8.13. Dijagram ovisnosti progiba o opterećenju za treće ispitno tijelo

Slika 8.14. Dijagram ovisnosti progiba o opterećenju za četvrto ispitno tijelo

Slika 8.15. Dijagram ovisnosti progiba o opterećenju za peto ispitno tijelo

POPIS TABLICA

Tablica 5.1. Svojstva staklenih tkanina

Tablica 5.2. Podaci o epoksidnoj smoli

Tablica 5.3. Podaci o umreživalu

Tablica 5.4. Broj slojeva staklene tkanine

Tablica 5.5. Masa smole

Tablica 5.6. Savojna čvrstoća i modul savitljivosti kompozita sa staklenom tkaninom
plošne mase 80 g/m^2

Tablica 5.7. Savojna čvrstoća i modul savitljivosti kompozita sa staklenom tkaninom
plošne mase 163 g/m^2

Tablica 5.8. Savojna čvrstoća i modul savitljivosti kompozita sa staklenom tkaninom
plošne mase 390 g/m^2

Tablica 5.9. Prividne međuslojne smične čvrstoće kompozita sa staklenom tkaninom
plošne mase 80 g/m^2

Tablica 5.10. Prividne međuslojne smične čvrstoće kompozita sa staklenom tkaninom
plošne mase 163 g/m^2

Tablica 5.11. Prividne međuslojne smične čvrstoće kompozita sa staklenom tkaninom
plošne mase 390 g/m^2

Tablica 5.12. Maseni udjeli ojačavala

Tablica 5.13. Udjeli šupljina u kompozitu

Tablica 5.14. Volumni udio vlakana raspoređenih u smjeru naprezanja

Tablica 8.1. Rezultati mjerenja progiba u ovisnosti promjene sile opterećenja

Tablica 8.2. Rezultati mjerenja progiba u ovisnosti promjene sile opterećenja

Tablica 8.3. Rezultati mjerenja progiba u ovisnosti promjene sile opterećenja

Tablica 8.4. Tvrdća u ovisnosti o vremenskom trajanju, kompozit s staklenom tkaninom
plošne mase 80 g/m^2

Tablica 8.5. Tvrdća u ovisnosti o vremenskom trajanju, kompozit s staklenom tkaninom
plošne mase 163 g/m^2

Tablica 8.6. Tvrdća u ovisnosti o vremenskom trajanju, kompozit s staklenom tkaninom
plošne mase 390 g/m^2

POPIS OZNAKA I MJERNIH JEDINICA FIZIKALNIH VELIČINA

t_{ex} - masa vlakana u gramima po 1000 m duljine

E - modul elastičnosti, [N/mm²]

R_m - rastezna čvrstoća, [N/mm²]

ρ - gustoća, [g/cm³]

η - viskoznost, [Pas]

F - sila, [N]

L - razmak između oslonaca, [mm]

b - širina ispitnog tijela, [mm]

h - visina ispitnog tijela, [mm]

R_{ms} - savojna čvrstoća, [N/mm²]

E_s - modul savitljivosti, [N/mm²]

f - progib ispitnog tijela, [mm]

F/f - koeficijent smjera pravca, [N/mm]

\bar{x} - aritmetička sredina

S - procijenjeno standardno odstupanje

τ - prividna međuslojna smična čvrstoća, [N/mm²]

H - tvrdoća kompozita, [N/mm²]

D - promjer kuglice, [mm]

h_p - dubina prodora kuglice, [mm]

v_s - specifični volumen smole, [cm³/g]

x_s - maseni udio smole, [%]

ρ_s - gustoća smole, [g/cm³]

v_v - specifični volumen vlakana, [cm³/g]

x_v - maseni udio vlakana, [%]

ρ_v - gustoća vlakana, [g/cm³]

u_v - volumni udio vlakana, [%]

v_k - specifični volumen kompozita, [cm³/g]

POPIS KRATICA

ABS - akrilonitril/butadien/stiren

ACM - e. *Advanced Composite Materials*

ASA - akrilonitril/stiren/akrilat

BMC - vlaknasti preprezi (e. *Bulk Moulding Compounds*)

CAD - konstruiranje s pomoću računala (e. *Computer Aided Design*)

CMC - kompoziti s ugljikovom matricom (e. *Carbon Matrix Composites*)

CVD - kemijsko taloženje iz parne faze (e. *Chemical Vapour Deposition*)

DICY - diciandiamid

FRC - kompoziti ojačani vlaknima (e. *Fibre Reinforced Composites*)

HCM - hibridni kompoziti (e. *Hybride Composite Material*)

ICS - injekcijsko izvlačenje duromernih kompozita (e. *Injection-compression System for Thermoset Composites*)

LCP - kapljeviti kristalni polimeri (e. *Liquid Crystal Polymer*)

MMC - kompoziti s metalnom matricom (e. *Metal Matrix Composites*)

MPD - polimetafenilen

MPI - injekcijsko prešanje s više uljevnih sustava (e. *Multiple Port Injection*)

NC - numeričko upravljanje (e. *Numerical Control*)

PA - poliamidi

PAI - poli(amid-imid)

PAN - poliakrilonitrila

PBT - poli(buten-tereftalat)

PC - polikarbonat

PE - polietilen

PEEK - poli(eter-eter-keton)

PEI - poli(eter-imid)

PET - poli(etilen-tereftalat)

PI - poliimid

PMC - kompoziti s polimernom matricom (e. *Polymer Matrix Composites*)

PMMA - poli(metil-metakrilat)

POM - poliacetal

PP - polipropilen

PPD - poli(p-fenilen-2,6-tereftalamid)

PPS - poli(fenilen-sulfid)

PPS - poli(fenilen-sulfid)

PS - polistiren

PSU - polisulfoni

PTFE - politetrafluoretilen

PVC - poli(vinil-klorid)

RRIM - reakcijsko injekcijsko prešanje ojačanih tvorevina (e. *Reinforced Reaction Injection Moulding*)

RTM - injekcijsko-posredno prešanje kapljevite smole s uložnim trodimenzionalnim predoblikom (e. *Resin Transfer Moulding*)

SAN - stiren/akrilonitril

SMARTM - injekcijsko-posredno prešanje kapljevite smole sa savitljivom dijafragmom i krutim postoljem (e. *Supported Mould Assisted Resin Transfer Moulding*)

SMC - pločasti osmoljeni matovi (e. *Sheet Moulding Compounds*)

SMPI - sekvencijsko injekcijsko prešanje (e. *Sequential Multiple Port Injection*)

SRIM - reakcijsko injekcijsko prešanje integralnih pjenastih duromernih otpresaka s predoblikovanim ojačavalom (e. *Structural Reaction Injection Moulding*)

TGMDA - tetraglicidil metilen dianilin

TMC - debelopločasti osmoljeni matovi (e. *Thick Moulding Compounds*)

TTT - vrijeme - temperatura - transformacija

UV - ultra ljubičasto (e. *Ultra Violet*)

VARTM - podtlačno injekcijsko prešanje kapljevite smole s uložnim trodimenzionalnim predoblikom (e. *Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding*)

1. UVOD

Tijekom sedamdesetih godina prošlog stoljeća iz potreba zrakoplovne i vojne industrije počeli su se razvijati novi materijali poboljšanih svojstava, kompozitni materijali. Kompozitni materijali sačinjeni su od dvaju ili više materijala i imaju bolja svojstva od svojih komponenata. Svojstva kompozita ojačanih vlaknima usporediva su sa svojstvima tradicionalnih materijala poput čelika ili aluminija. Kompoziti imaju prednost pred ovim materijalima zbog velikih ušteda u masi proizvoda, ali i zbog ostalih prednosti poput: postizanja kompleksnih oblika, toplinske postojanosti, kemijske postojanosti i postojanosti koroziji. Mnoge vrste kompozitnih materijala razvijene su iz potrebe za materijalima specifičnih svojstava kakvi do tada nisu postojali. Kompozitni materijali mogu imati kombinaciju vrlo različitih svojstava.

Polimerni kompoziti najraširenija su skupina kompozita. Oni uz navedene prednosti kompozitnih materijala nude i druge prednosti poput: niže cijene, lagane preradljivosti, mogućnosti prerade konvencionalnim postupcima prerade, pogodnosti masovnoj proizvodnji i mogućnosti recikliranja. Polimerni kompoziti sve više zamjenjuju konvencionalne materijale u mnogim granama industrije poput automobilske, zrakoplovne i građevinske industrije.

U ovom radu provedeno je ispitivanje mehaničkih svojstava kompozita s različitim plošnim masama staklene tkanine odnosno različitim brojem slojeva tkanine. Cilj rada je utvrditi utjecaj broja slojeva tkanine, odnosno gustoće vlakana na mehanička svojstva kompozita.

2. OPĆENITO O KOMPOZITIMA

Kompoziti su materijali proizvedeni umjetnim spajanjem dvaju ili više materijala koji se razlikuju u sastavu i svojstvima i između kojih postoji jasna, prepoznatljiva granica. Valjana kombinacija materijala u kompozitima poboljšava svojstva koja se prenose sa konstituentata na načelu zajedničke sprege. Tako se mogu proizvesti materijali neuobičajenih kombinacija svojstava. Kompoziti se obično sastoje od ojačavala odnosno očvršćivala objedinjenog u matrici [1].

Kompoziti su se razvili iz potrebe za materijalima niže gustoće i boljih mehaničkih svojstva, toplinskih svojstava (toplinska provodnost, toplinska rastezljivost, specifični toplinski kapacitet, omekšavalište i talište), električnih svojstava (električna provodnost / otpor), optičkih i akustičnih svojstava i kemijske postojanosti [2].

Kod kompozita svojstva se poboljšavaju objedinjavanjem raspršenih faza u matricu koja može biti polimerna, metalna ili keramička. Prema tome, kompoziti se dijele na kompozite s keramičkom matricom, kompozite s metalnom matricom (e. *Metal Matrix Composites (MMC)*), kompozite s polimernom matricom (e. *Polymer Matrix Composites (PMC)*), kompozite s ugljikovom matricom (e. *Carbon Matrix Composites (CMC)*), hibridne kompozite (e. *Hybride Composite Material (HCM)*) i kompozite s keramičkom/metalnom/polimernom matricom. Matrice obično imaju manji modul rastezljivosti, dok ojačavala imaju 50 puta višu čvrstoću i 20 do 150 puta veću krutost. Svojstva kompozita ovise o jačini veza između pojedinih komponenti. MMC i CMC kompoziti razvijeni su za primjene pri povišenim temperaturama ($> 310\text{ }^{\circ}\text{C}$), gdje PMC kompoziti ne odgovaraju. MMC kompoziti primjenjuju se tamo gdje je potrebna toplinska provodnost i provođenje električne energije [2].

Kompoziti se najčešće koriste kako bi se poboljšala strukturna svojstva pri čemu se ojačavalo javlja u oblicima čestica, kontinuiranih ili kratkih vlakana. Ovisno o omjeru dimenzija čestica, kompoziti se dijele na kompozite ojačane česticama, kompozite ojačane kontinuiranim vlaknima i kompozite ojačane kratkim vlaknima. Volumni udio

ojačavala kreće se od 10 % pa na više. Kod kompozita ojačanih česticama matrica nosi glavno opterećenje, a male dispergirane čestice onemogućuju gibanje dislokacija u matrici. Kod njih je opterećenje raspoređeno između matrice i čestica. Kod kompozita ojačanih vlaknima (e. *Fibre Reinforced Composites (FRC)*) vlakna nose glavno opterećenje, a funkcija matrice ograničena je na distribuciju opterećenja i prenošenje opterećenja na vlakna. Oštećenjem nekoliko vlakana opterećenje se prenosi na ostala vlakna tako da ne dolazi do lomova kao kod homogenih materijala. Laminati su još jedna skupina kompozita kod koje se potporni, ojačavajući materijal nalazi u međusobno povezanim kontinuiranim slojevima [3].

Podjela kompozita mogla bi se napraviti i prema veličini čestica: makrokompoziti (postojanje više od jedne prepoznatljive faze, veličina čestica veća od 1 mm), mikrokompoziti (postojanje jedne prepoznatljive faze, veličina čestica manja od 10 - 1000 nm) i nanokompoziti s česticama manjim od 25 nm [2].

Sedamdesetih godina dvadesetog stoljeća razvijena je nova vrsta kompozita visoke čvrstoće i krutosti, tzv. ACM kompoziti (e. *Advanced Composite Materials*). Vlakna ovih kompozita imaju visoku rasteznu čvrstoću i visoki rastezni modul, najčešće su to ugljikova vlakna, borna vlakna, vlakna silicijevog karbida i aluminijska vlakna. Gustoća matrice treba biti što niža, a mora imati i visoku toplinsku postojanost. Ovi materijali najprije su našli primjenu u zrakoplovnoj industriji [2].

Metalni kompoziti imaju sljedeća svojstva: veliki raspon temperature primjene, dobra mehanička svojstva poput visoke krutosti, čvrstoće i žilavosti, te visoku provodnost topline i električne energije. Oni u usporedbi s metalima imaju veće omjere čvrstoće i gustoće, veću dinamičku izdržljivost, manju toplinsku rastezljivost, bolju otpornost trošenju, te bolju korozijsku postojanost. Nedostaci ovih kompozita su veća gustoća od ostalih kompozita, moguća korozija uslijed različitih elektrodnih potencijala komponenata, skupa izrada i nedovoljno razvijena tehnologija proizvodnje [2].

Keramički kompozitni materijali imaju visoku toplinsku postojanost ($> 2000\text{ }^{\circ}\text{C}$), odličnu postojanost trošenju, dobru korozijsku postojanost, dimenzijsku stabilnost, nisku gustoću i visoki rastezni modul. Nedostatak im je krhkost, neujednačenost svojstava i niska rastezna čvrstoća. Koriste se kod izrade turbina zrakoplova [2].

Ugljikovi kompoziti s ugljikovim vlaknima podnose temperature više od $2200\text{ }^{\circ}\text{C}$. S porastom temperature raste im čvrstoća. Karakteriziraju ih visoki omjeri čvrstoće i gustoće, odlična dimenzijska stabilnost i dinamička izdržljivost. Nedostatak im je visoka cijena komponenti i proizvodnog procesa. Primjenjuju se kod izrade mlaznica raketnih motora i kod izrade implantanta zbog svoje korozijske postojanosti i biološke inertnosti [2].

3. POLIMERNI KOMPOZITI

Polimerni kompoziti najrazvijenija su skupina kompozitnih materijala. Imaju svojstva usporediva sa svojstvima čelika ili aluminija. Zbog niske gustoće, visoke čvrstoće i krutosti, te dobre toplinske postojanosti primjenjuju se u zrakoplovnoj, automobilske industriji i građevinarstvu gdje u sve većem udjelu zamjenjuju tradicionalne materijale. Njima se lako mogu postići vrlo kompleksni oblici što otvara nove mogućnosti u konstruiranju. Matrice ovih kompozita mogu biti izrađene od plastomera ili duromera. Najčešći oblik ojačavala su vlakna koja daju kompozitu visoku čvrstoću i rastezni modul, dok matrica raspoređuje opterećenje i štiti vlakna od vanjskih utjecaja [4].

Plastomerni kompoziti omekšavaju prilikom zagrijavanja pri temperaturi kristalizacije plastomera koja iznosi otprilike 220 °C. Prema tome, plastomerni kompoziti imaju mali raspon temperatura primjene. Mogu se prerađivati uobičajenim postupcima prerade plastomera, mogu se lako preoblikovati uz pomoć tlaka i topline. Najčešće korišteni plastomeri su: poliolefini (polipropilen (PP), polietilen (PE)), vinilni plastomeri (poli(vinil-klorid)(PVC)), poliamidi, poliacetali, polifenileni (poli(fenilen-sulfid)(PPS)), polisulfoni i poli(eter-eter-keton)(PEEK) [2].

Duromerni kompoziti poprimaju oblik i umrežuju tijekom proizvodnje nakon čega više nije moguće izmijeniti oblik uz pomoć topline kao kod plastomera. Duromerna matrica ovih kompozita je nerastaljiva. Kako bi se olakšala prerada ovih kompozita, duromerne smole obično su dostupne u posebnom, djelomično umreženom stanju (tzv. B-stupanj). Kombinacija ojačavala i ove smole, obično u slojevima debljine 1 mm naziva se prepreg (skraćeno od e. *pre-impregnation*). Stanje konačnog oblika kada je smola potpuno umrežena naziva se C-stupanj. Najčešće korišteni duromeri su nezasićeni poliesteri, epoksidne smole i poliimidi. Poliesteri se koriste kao matrica u kombinaciji sa staklenim vlaknima, niske su gustoće, jeftini su, otporni na vanjske uvjete i temperature do 100 °C. Oni su najrasprostranjenija vrsta duromernih smola, koriste se u autoindustriji. Zbog loših mehaničkih svojstava i skupljanja tijekom umreživanja nisu pogodni za izradu kompliciranijih proizvoda. Epoksidne smole nešto su skuplje od poliestera i imaju manje

skupljanje tijekom umreživanja. Imaju dobra mehanička svojstva, dimenzijsku stabilnost, dobru prionljivost s različitim ojačavalima i bolju postojanost na vlagu. Maksimalna temperatura primjene je nešto viša i iznosi oko 175 °C. Polimidi imaju još višu maksimalnu temperaturu primjene, koja iznosi oko 300 °C, ali ih je teško prerađivati [2].

3.1. Matrica [2]

Matrica najčešće čini 30 do 40 % strukture kompozita. Ima brojne zadaće: veže komponente, određuje toplinsku postojanost kompozita i mehanička svojstva, štiti ojačavalu od trošenja i vanjskih uvjeta, pomaže u raspodjeli opterećenja na ojačavalu, zadržava željenu orijentaciju vlakana i razmak između specifičnih struktura.

3.1.1. Polimeri za izradu matrica

Polimerne matrice moraju osigurati nisku gustoću kompozita i u isto vrijeme visoku žilavost, čvrstoću, dinamičku izdržljivost i što veću toplinsku postojanost. Iako matrice imaju malu ulogu u nošenju rasteznih naprezanja one moraju imati visoki rastezni modul i modul smičnosti kako ne bi došlo do savijanja vlakana pod opterećenjem. Ostala željena svojstva polimerne matrice su: dobro vlaženje i vezanje s drugim sastojkom, elastičnost, niska toplinska rastezljivost i skupljanje, kemijska postojanost, dimenzijska postojanost, laka preradljivost i visoka tecljivost kako bi ne bi došlo do zaostalih šupljina. Danas gotovo 75 % polimernih kompozita čine kompoziti s duromernom matricom. 85 % duromernih matrica izrađeno je od nezasićenog poliestera, a 15 % od epoksidnih smola. Plastomerne matrice najčešće su izrađene od polipropilena [2], [3].

3.1.1.1. Duromeri

Duromeri se zbog lakše preradljivosti češće koriste pri izradi polimernih kompozita. Na početku su to najčešće reaktivni polimeri niske molekulne mase. Općenito sadrže dvije (oligomer i umreživalo) ili više komponenata koje čine umreživalo i/ili očvršćivalo. Skrućivanje počinje kada su komponente izmiješane pri sobnoj ili pri povišenoj temperaturi. Tijekom umreživanja postoje međustadiji od tekućeg, poluumreženog do potpuno umreženog stanja. Preko TTT dijagrama u kojem su vidljiva ova stanja može

se optimizirati proces umreživanja. Nakon potpunog umreživanja tijekom kojeg se zbivaju ireverzibilne kemijske reakcije dobiva se kruta umrežena struktura [2].

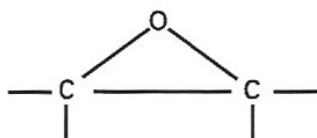
Nedostaci duromernih kompozita su krhkost pri sobnim temperaturama, niska žilavost, zaostala naprezanja između vlakana i matrice, vodoupojnost, dugotrajni proizvodni procesi s više međukoraka. Oni se više ne mogu preoblikovati ponovnim zagrijavanjem zbog jakih kemijskih veza što suzuje mogućnosti recikliranja. Duromeri u usporedbi s plastomerima imaju višu rasteznu čvrstoću i modul, bolju postojanost na kemikalije i otapala, dobru dimenzijsku stabilnost, bolju toplinsku postojanost (postojanost pri povišenim temperaturama, nema mekšanja kod povišenih temperatura) i bolju postojanost puzanju. Zbog niske viskoznosti lakše se prerađuju u usporedbi s plastomernim kompozitima. Viskoznost ne smije biti visoka kako ne bi došlo do stvaranja šupljina ili mjesta bez smole [4].

Duromerni polimeri za izradu matrica prema temperaturi primjene mogu se podijeliti u tri skupine:

- nisko temperaturne duromerne matrice (uglavnom poliesteri)
- srednje temperaturne duromerne matrice (uglavnom fenoli)
- visoko temperaturne duromerne matrice (uglavnom poliimidi) [2].

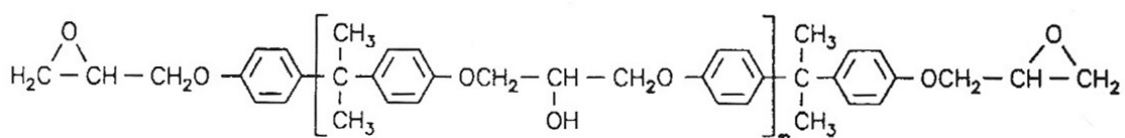
3.1.1.1.1. Epoksidna smola [2]

Početni materijal za epoksidnu matricu su kapljevite organske smole niske molekulne mase koje sadrže epoksidne skupine. Epoksidne skupine su trokutni prsteni s jednim atomom kisika i dva atoma ugljika. Epoksidna skupina prikazana je na slici 3.1.



Slika 3.1. Epoksidna skupina [2]

Nakon reakcije s umreživalom postiže se visoka krutost, postojanost otapalima i povišenim temperaturama. Najčešće korištena epoksidna smola je diglicidil eter bisfenola A, kod koje se koriste različita umreživala (amini). Kemijska struktura te smole prikazana je na slici 3.2. Razvijene su i druge vrste ovih smola, primjerice TGMDA (tetraglicidil metilen dianilin) koja je postojana na visoke temperature i koristi se u zrakoplovnoj industriji.



Slika 3.2. Kemijska struktura epoksidne smole [2]

Umreživala koja se koriste kod epoksidnih smola su ili koreaktanti (koji se ugrađuju u strukturu tijekom reakcije) ili djeluju kao katalizatori koji ubrzavaju umreživanje. Prvi tip umreživala dijeli se prema kiselosti na bazične primarne/sekundarne amine, poliaminoamide i na kisele anhidride i polifenole. Ovisno o kiselosti umreživala, umreživanje se zbiva pri sobnoj temperaturi ili pri povišenim temperaturama.

Odabir epoksidne smole za matricu ovisi o željenim svojstvima kompozita budući da prema vrstama epoksidnih smola variraju toplinska i mehanička svojstva. Na svojstva utječe tip umreživala i ubrzavala. Kod krhkih epoksidnih smola temperatura primjene viša je nego kod smola više čvrstoće i iznosi maksimalno 250 °C. Stupanj polimerizacije utječe na preradljivost i umreživanje. Za konstrukcijske primjene koristi se očvršćivalo diciandiamid (DICY). Pažljivim odabirom odgovarajućih duromera, umreživala, ubrzavala i njihovih omjera mogu se postići željena svojstva. Istraživanjima se došlo do kompozita više čvrstoće, žilavosti, rasteznog modula, postojanosti na vlagu i povišene temperature kakvi se primjenjuju u zrakoplovnoj industriji. Ovi materijali ne zahtijevaju hidrauličke strojeve s kalupima budući da se tijekom procesa umreživanja ne stvaraju drugi spojevi i šupljine.

Kompoziti s matricom od epoksidne smole imaju sljedeće prednosti: širok raspon svojstava, malo skupljanje tijekom umreživanja, dobru kemijsku postojanost, dobro prijanjanje ojačavala, visoku dinamičku izdržljivost, postojanost puzanju, te dobra električna svojstva.

Nedostaci tih kompozita su: osjetljivost na vlagu (nakon upijanja 1 do 6 % vlage dolazi do pada mehaničkih svojstava i gubitka točnosti dimezija), otežano kombiniranje žilavosti i postojanosti na povišene temperature, visoka toplinska rastezljivost, podložnost razgradnji pod UV zrakama i cijena.

3.1.1.1.2. Poliesteri (nezasićeni) [2]

Nezasićeni poliesteri su makromolekule koje se sastoje od nezasićene komponente (anhidrid maleinske kiseline ili fumarna kiselina preko kojih se dalje odvija reakcija) i zasićene dibazične kiseline ili anhidrida s oksidima. Ovisno o kombinaciji tih kemijskih spojeva dobivaju se različite vrste poliestera. Posebnu skupinu čine vinilne smole koje imaju odlična mehanička i toplinska svojstva.

Najčešće je poliester otopljen u reaktivnom vinilnom monomeru. Reakcije umreživanja zbivaju se između nezasićenog polimera i nezasićenog monomera pri čemu se nisko viskozna otopina polako pretvara u krutu strukturu. Ova smola umrežuje uz pomoć umreživala sa slobodnim radikalima. Umreživanje se može ubrzati povišenjem temperature. Prilikom umreživanja dolazi do skupljanja materijala (7 - 27 %).

Iako su poliesteri dobrih svojstava, bolja rastezna čvrstoća i postojanost na krhki lom mogu se poboljšati odgovarajućom toplinskom obradom. Zbog postojanja visokog udjela aromatskih vinilnih skupina postoji opasnost toplinsko-oksidacijske razgradnje što ograničava korištenje ovih kompozita pri povišenim temperaturama.

Prednosti su dobar omjer cijene i svojstava, dobra mehanička i električna svojstva, otpornost puzanju, postizanje visoke kvalitete površine, mogućnost postizanja bilo koje boje površine ili prozirnosti, dobra postojanost na većinu kemikalija i na vanjske uvjete,

pogodnost prerade mnogim postupcima i izrade velikih dijelova kakvi se koriste u brodogradnji [3].

Nedostaci su zapaljivost, veliko skupljanje nekih vrsta poliestera, otežana preradljivost kod nekih postupaka, ograničena postojanost na lužine, kiseline, vodenu paru i neka otapala [3].

Koriste se u automobilskoj i električnoj industriji, građevinarstvu, brodogradnji, za izradu namještaja, kućanskih aparata i ukrasa [3].

3.1.1.1.3. Poliimidi i bismaleimidi [2]

Poliimidne matrice najčešće se koriste kod kompozita koji se primjenjuju u zahtjevnijim uvjetima. Poliimidi se dijele na kondenzacijske, adicijske i plastomerne poliimide. Kondenzacijski poliimidi imaju izvrsna svojstva, u upotrebi mogu zamijeniti čelik ili staklo, no prilično su skupi. Bismaleimidi su poliimidi s modificiranom strukturom, nazivaju se i adicijski poliimidi. Razvili su se za potrebe zrakoplovne industrije. Teško su zapaljivi, zadržavaju odlična mehanička svojstva i postojanost na povišenim temperaturama i u agresivnom okolišu na dulja vremenska razdoblja, a nedostatak im je krhkost.

3.1.1.1.4. Fenoli [3]

U fenolne smole mogu se dodati materijali različitih svojstava poput: staklenih vlakana, drvnog brašna, tinjca, grafita, gume, tkanina, politetrafluoretilena (PTFE). Dodaci zauzimaju do 75 % volumnog udjela. Prednosti fenolnih smola su niža cijena, dobra toplinska postojanost, visoko talište, dobra mehanička svojstva i postojanost puzanju. Nedostaci su tamnije boje, veliko skupljanje, mala istezljivost i elastičnost, nepostojanost na lužine i jake kiseline, te neprikladnost za primjenu u prehrambenoj industriji zbog ispuštanja amonijaka. Ove smole pogodne su za mnoge proizvodne postupke i primjenjuju se u mnogim granama industrije poput zrakoplovne, automobilske ili električne.

3.1.1.1.5. Poliuretani (PUR) [3]

Poliuretani se dobivaju reakcijom poliola i izocijanata. Polioli mogu biti poliesteri ili polieteri o čijem odabiru ovise svojstva poliuretana. Svojstva im mogu biti dosta različita, od vrlo krutih struktura do vrlo elastičnih pjena. Prednosti su dobar omjer cijene i svojstava, dobra mehanička i toplinska svojstva, mogućnost prerade raznim proizvodnim postupcima, te veliki raspon rasteznih modula i svojstava ovisno o vrsti poliuretana. Nedostaci su im osjetljivost na vlagu, kiseline i lužine, starenje i zapaljivost. Kompoziti od poliuretana uglavnom se primjenjuju u automobilske industriji, građevinarstvu i kod izrade namještaja.

3.1.1.1.6. Policijanati [3]

Policijanati se uglavnom rabe za izradu kompozita posebnih namjena. Prednosti su im postojanost na povišene temperature, postojanost zamoru, dobra mehanička svojstva, te otpornost na vatru i okolišne uvjete. Uz to se lakše prerađuju od poliimida. Nedostaci su viša cijena, te dugotrajno vrijeme izrade. Koriste se u zrakoplovnoj i elektroničkoj industriji.

3.1.1.2. *Plastomerne matrice*

Plastomeri omekšavaju dovođenjem topline, mogu se rastaliti i prerađivati. U proizvodnji kompozita njima se postižu manji troškovi proizvodnje zbog kraćih vremena proizvodnje i mogućnosti korištenja visokoproduktivne proizvodne opreme kakva se koristi u proizvodnji plastomera. Ostale pogodnosti plastomera su: visoka kvaliteta, laka kontrola kvalitete, te lagana preradljivost. Imaju višu žilavost, postojanost na udarce i oštećivanje u usporedbi s duromernim kompozitima. Nedostaci su im visoka toplinska rastezljivost i vodoupojnost što može dovesti do zaostalih unutarnjih naprezanja i razaranja strukture. Također visoka viskoznost taljevine otežava preradu. Često su potrebni postupci prešanja kako bi se ostvarilo dobro vezanje matrice i vlakana, odnosno dobila kompaktna struktura. Na svojstva mogu utjecati varijacije u stupnju kristalizacije zbog različitih brzina hlađenja i stupanj impregniranosti vlakana plastomerom na pojedinim dijelovima kompozita. Ovo može dovesti do nejednolikosti strukture. U nastavku će biti opisani važniji plastomeri [2], [4].

3.1.1.2.1. Polietilen (PE) i polipropilen (PP) [3]

Prednosti su im niska cijena, dobra mehanička svojstva, laka preradljivost, niska gustoća, postojanost na kemikalije, niski faktor trenja i pogodnost za primjenu u prehrambenoj industriji. Nedostaci su ograničena postojanost na UV zrake, niska krutost, niska postojanost puzanju, te otežano lijepljenje.

3.1.1.2.2. Poli(vinil-klorid) (PVC) [3]

Svojstva poli(vinil-klorida) su različita ovisno o tome je li krut ili omekšan. Mehanička svojstva ovise o strukturi. Prednosti krutog PVC-a su krutost pri sobnoj temperaturi, niska cijena, kemijska postojanost, samogasivost, te dimenzijska stabilnost. Njegovi nedostaci su osjetljivost na UV zrake, toplinu i puzanje. Imaju veću gustoću i krhkost pri niskim temperaturama. Prednosti i nedostaci omekšanog PVC-a su slični kao i kod krutog, no oni posjeduju veću elastičnost i bolja svojstva pri niskim temperaturama.

3.1.1.2.3. Polistiren (PS) [3]

Prednosti polistirena su niska cijena, prozirnost, krutost, dimenzijska stabilnost, te izolacijska svojstva. Nedostaci su mu osjetljivost na UV zrake, niske i povišene temperature i otapala, te zapaljivost. Polistiren može biti modificiran pa se dobivaju stiren/akrilonitril (SAN) visoke krutosti i bolje postojanosti kemikalijama, akrilonitril/butadien/stiren (ABS) boljih mehaničkih svojstava, te akrilonitril/stiren/akrilat (ASA) bolje postojanosti na vanjske uvjete.

3.1.1.2.4. Poliesteri [2]

Poliesteri su bazirani na ftalatima i sadrže estersku skupinu (-COO-) u glavnom lancu. Postoje dvije glavne skupine poliestera: aromatsko-alifatski i aromatski.

U aromatsko-alifatske pripadaju PET (poli(etilen-tereftalat)) i PBT (poli(buten-tereftalat)). PET ima visoku čvrstoću, tvrdoću, krutost i dobru postojanost trošenju i puzanju. PBT se može prerađivati pri nižim temperaturama u odnosu na PET, ali ima lošija mehanička svojstva. Zbog visokog tališta zadržavaju dobra mehanička svojstva i pri povišenim

temperaturama. Također su dobre kemijske postojanosti. Temperature primjene kreću se od 120 °C do 240 °C.

Aromatski poliesteri nazivaju se i poliarilati. Oni nastaju reakcijom bisfenola A i izoftalne kiseline. Poliarilati imaju svojstva samogasivosti, dobra mehanička i električna svojstva. Osjetljivi su na toplinu, čijim dovođenjem tamne ali se pri tome mehanička svojstva bitno ne mijenjaju.

U poliestere spadaju i kapljeviti kristalni polimeri (e. LCP *Liquid Crystal Polymer*) od kojih su poznatiji pod trgovačkim imenima *Xydar* i *Vectra*. Oni imaju dobra toplinska svojstva.

3.1.1.2.5. Poli(metil-metakrilat) (PMMA) [3]

Prednosti PMMA su prozirnost, postojanost na UV zrake i vanjske uvjete, dobra mehanička svojstva, krutost, te postojanost puzanju. Nedostaci su niska savojna žilavost i osjetljivost na povišene temperature.

3.1.1.2.6. Poliacetal (POM) [3]

Poliacetali nude dobar omjer cijene i svojstava, elastični su, imaju dobru postojanost puzanju, malu vodupojnost i dobra tribološka svojstva. Nedostaci su im visoko skupljanje, visoka toplinska rastezljivost, osjetljivost na svjetlo i nepostojanost na kemikalije.

3.1.1.2.7. Polikarbonat (PC) [3]

Polikarbonat ima visoku prozirnost, dobra mehanička svojstva, visoku savojnu žilavost, postojanost puzanju, nisko skupljanje i vodupojnost, veliki raspon temperatura primjene (od -100 °C do +135 °C). Nedostaci su mu osjetljivost na svjetlo i vanjske uvjete, te zapaljivost.

3.1.1.2.8. Poliamidi (PA) [2]

Poliamidi se označuju prema brojčanom sustavu koji označava broj atoma ugljika u monomernim lancima. Poliamidi imaju dobru elastičnost, visoku čvrstoću, žilavost i postojanost abraziji. Mehanička svojstva se zadržavaju do temperature oko 150 °C. Zadržavaju žilavost i elastičnost i pri niskim temperaturama. Viši poliamidi (PA610, PA612) pokazuju manju krutost i nižu postojanost povišenim temperaturama nego niži poliamidi (PA6, PA66), ali imaju poboljšanu kemijsku postojanost i manje upijaju vodu.

Osim alifatskih poliamida postoje i aromatski poznatiji kao aramidi. Poznatiji aramidi su *Nomex* (trgovačko ime za MPD (polimetafenilen)) i *Kevlar* (trgovačko ime za PPD (poli(p-fenilen-2,6-tereftalamid))). Oni su često korišteni zbog visoke čvrstoće, dobrog omjera čvrstoće i gustoće i niske zapaljivosti. Svojstva su im usporediva sa svojstvima čelika, ali su 20 % lakši.

3.1.1.2.9. Poli(aril-eter) [2]

U ovu skupinu pripadaju polisulfoni (PSU) i poli(eter-eter-keton) (PEEK)

Polisulfoni su skupina amorfnih aromatskih plastomera s talištem pri 185 °C i temperaturama primjene do 160 °C. Imaju dobru postojanost na većinu kiselina i otopina, međutim bubre i otapaju se u polarnim organskim spojevima. Poli(aril-eter) sulfoni imaju dobru postojanost pri povišenim temperaturama, postojanost puzanju, krutost i prozirnost.

PEEK je kristalasta smola sive boje s izuzetnom postojanošću na otapala. Ima visoko talište (290 °C), visoku toplinsku postojanost, zadržava svojstva pri povišenim temperaturama na duga vremenska razdoblja i samogasiva je. Uglavnom se primjenjuje u zrakoplovnoj i vojnoj industriji.

3.1.1.2.10. Poliimid (PI) [2]

Plastomerni poliimidi su linearni polimeri dobiveni polimerizacijom poliaminske kiseline i alkohola. Ovisno o vrstama ovih kemijskih spojeva dobivaju se različiti poliimidi. Imaju

dobru toplinsku postojanost i dobru postojanost na vanjske uvjete. Najčešće su u uporabi poli(eter-imid) (PEI) i poli(amid-imid) (PAI).

3.1.1.2.11. Poli(fenilen-sulfid) (PPS)

PPS je kristalasti polimer s talištem pri 287 °C. PPS oksidira pri povišenim temperaturama. Ima dobru toplinsku postojanost, nisko stezanje, postojanost na kemikalije i nisku vodoupojnost. Ima veliki raspon temperatura primjene koje se kreću od -190 °C do 240 °C. Dobar je električni izolator. Krhak je, a mehanička svojstva se poboljšavaju dodavanjem vlakana. Jedan je od najskupljih plastomera [2], [3].

3.2. Oblici ojačavala

U najširem smislu, kompoziti su rezultat kombinacije određenog udjela ojačavajućeg materijala, ojačavala visoke čvrstoće i krutosti i matrice niskog rasteznog modula. Svojstva kompozita ovisna su o svojstvima komponenata, njihovim udjelima, međusobnoj interakciji i rasporedu (veličini, obliku, distribuciji i orijentaciji). Općenito kompoziti se prema vrsti ojačavala mogu podijeliti u tri skupine: kompoziti ojačani česticama, kompoziti ojačani vlaknima i strukturni kompoziti. Strukturni kompoziti su kombinacija kompozita i homogenih materijala, to su tipično laminati [2].

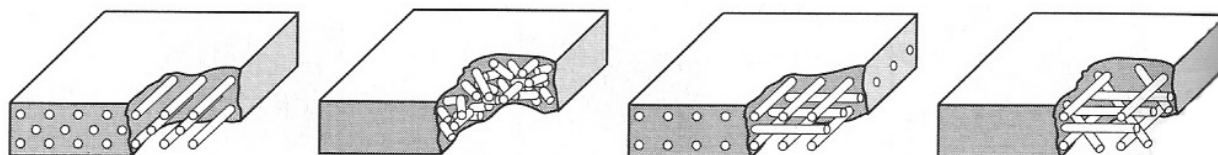
Čestice mogu imati različiti utjecaj na svojstva kompozita. Duktilne čestice dodane u krhku matricu povisuju žilavost, a dodavanjem tvrdih i krutih čestica u duktilnu matricu povisuje se čvrstoća i krutost. Tvrdе čestice snizuju žilavost matrice ograničavajući mogućnosti primjene kompozita. Česticama ojačani kompoziti mogu se prema mehanizmu očvršćenja podijeliti u one s velikim česticama i sa dispergiranim česticama. Kompoziti s velikim česticama sastoje se od pravilno raspoređenih čestica veličine veće od 0,1 mm, približno okruglog oblika. One su obično tvrđe i kruće od matrice i nastoje ograničavati deformaciju matrice. Ovi kompoziti mogu imati bilo koju od tri tipa matrice: polimernu, metalnu ili keramičku. Tipičan primjer kompozita ojačanog velikim česticama je beton. Kompoziti s dispergiranim česticama sadrže čestice vrlo malih dimenzija (0,01-0,1 mm). Kod tih kompozita matrica nosi glavno opterećenje, dok male raspršene čestice onemogućavaju gibanje dislokacija u matrici, pa su time ograničene i plastične

deformacije. Kod tih kompozita veze između matrice i čestica zbivaju se na molekularnoj razini, pa oni imaju višu granicu razvlačenja i rasteznu čvrstoću. Tipičan primjer tih čestica je čađa koja se dodaje kaučukovoj smjesi kako bi se poboljšala mehanička svojstva i postojanost trošenju [2].

Kod vlaknima ojačanih kompozita vlakna nose glavno opterećenje, a funkcija matrice je ograničena na distribuciju opterećenja i prijenos opterećenja na vlakna kao i držanje vlakana na mjestu. Cilj je povećanje krutosti i čvrstoće. Vlakna su kontinuirani materijali čija duljina iznosi najmanje 200 iznosa promjera vlakna. Struk je kontinuirani snop vlakana. Drugi naziv za kontinuirana vlakna je filamenti. Viskeri su monokristalna metalna vlakna čija struktura je sačinjena od kratkih vlakana bakra, grafitu ili silicijevog karbida. Postoje i višefazna vlakna kod kojih se na površini jedne vrste vlakna stvara druga vrsta vlakna. Primjer su vlakna od silicijevog karbida stvorena na površini žice volframa [2].

Vlakna se prema načinu nastanka dijele u dva razreda: prirodna vlakna (vlakna dobivena iz minerala, biljaka ili životinjskog porijekla) i sintetska vlakna. Sintetska vlakna imaju jednolikije dimenzije, predvidljiva svojstva i ekonomičnija su. Najčešće se primjenjuju staklena vlakna [2].

Prema načinu rasporeda vlakana u matrici ona se dijele na: kontinuirana jednosmjerna vlakna, slučajno usmjerena diskontinuirana vlakna, ortogonalno raspoređena vlakna i višesmjerno usmjerena vlakna. Na slici 3.3 prikazani su navedeni načini rasporeda vlakana [1].



Slika 3.3. Načini rasporeda vlakana [1]

3.2.1. Ojačavala [2]

Postoji veliki broj dodataka koji se dodaju polimerima, od kojih su najzastupljenija punila kojima se snizuje cijena. Ojačavala su posebna vrsta punila koja mogu biti u obliku čestica ili vlakana.

3.2.1.1. Ojačavala u obliku čestica [2]

Čestice imaju oblik približan obliku sfere, pri čemu neke mogu imati nepravilniji oblik ili biti porozne. One su najčešće rabljeno ojačavalo zbog svoje niske cijene. Njima se postižu izotropna svojstva kompozita. Dije se na organske i anorganske. Organske čestice imaju nisku toplinsku postojanost i nisku gustoću. Primjeri organskih čestica su čestice celuloze, škroba i ugljika. Primjeri anorganskih ojačavajućih čestica su čestice silicija, stakla, gline i oksidi metala (aluminija).

3.2.1.2. Ojačavala u obliku vlakana

Četiri glavna faktora o kojima ovise mehanička svojstva kompozita ojačanog vlaknima su: mehanička svojstva vlakana, prionljivost vlakana i matrice, udio vlakana i njihova orijentacija. Cilj vlakana je povisiti rastezni modul, čvrstoću, toplinsku postojanost oblika i postojanost puzanju [5], [2].

Ojačavajuća vlakna također mogu biti organskog ili anorganskog porijekla. Od organskih najvažnija su celulozna vlakna, a pojavljuju se u obliku tkanine, prediva ili konopa. Lignocelulozna vlakna jute ili agave često se koriste kod ojačavanja fenola i poliestera. Organskim vlaknima ojačavaju se poliamid, polietilen i polipropilen. Mogu se javiti u obliku vlakana, tkanih ili netkanih tkanina ili strukova. Ugljikova vlakna se primjenjuju za ojačavanje metala, ali i polimernih matrica, smatraju se organsko-sintetskim ojačavalima. Primjer anorganskih prirodnih vlakana su azbestna i staklena vlakna, borna vlakna, keramička vlakna (silicijev karbid, aluminijev oksid). Postoje i metalna vlakna aluminija, bakra, čelika i drugih metala koja se pojavljuju u oblicima vlakana, žica i viskera. Rizici koji se javljaju kod primjene vlakana su oštećenja vlakana prilikom prerade i anizotropnost svojstava. U nastavku biti će opisana neka od važnijih vlakana [2], [3].

3.2.1.2.1. Staklena vlakna

Staklena vlakna proizvode se iz staklene taljevine postupkom izravnog vučenja. Taljevina se ekstrudira kroz blazinicu izrađenu od platine koja sadrži nekoliko tisuća malih konusnih rupica promjera izlaza 0,7 mm. Vlakna se izvlače kroz rupicu nakon čega skrućuju. Tipični promjeri staklenih vlakana variraju od 3 do 20 μm . Vlakna se zatim predu u snopove vlakana. Iz snopova vlakana sjeckanjem se dobivaju kratka staklena vlakna kakva se koriste kao ojačavalo kod injekcijskog prešanja. Na vlakna se nanašaju razni dodaci i veziva koji poboljšavaju vezanje sa matricom i drugim vlaknima i zaštićuju ih od oštećenja [6].

Staklo je amorfni materijal sastavljen od silicijeve strukture. Prema kemijskom sastavu postoji više vrsta stakla: A staklo, C staklo, D staklo, E staklo, M staklo i S staklo. Kao ojačavalo najčešće se rabi E staklo, gotovo u 90 % slučajeva. E staklo ima nisku električku vodljivost. Tamo gdje su potrebna bolja mehanička svojstva primjenjuju se vlakna S stakla koja imaju višu rasteznu čvrstoću i viši rastezni modul. C stakla primjenjuju se gdje je potrebna veća kemijska postojanost. M stakla imaju veću krutost, a D stakla nisku dielektričku konstantu. Staklena vlakna dolaze u oblicima strukova, pređa, vlakana ili matova. Gotovo 95 % vlakana koja se primjenjuju kod kompozita čine staklena vlakna [2], [3], [6].

Staklena vlakna imaju visoku toplinsku postojanost, dobra izolacijska svojstva, rastezni modul viši nego kod polimera ali niži od ugljikovih vlakana, visoku gustoću, nisku toplinsku rastezljivost i krhka su [2], [3].

Staklena vlakna se kod kompozita koriste zbog velike varijabilnosti u duljini vlakana koja vodi do dobrih svojstava. Ova vlakna imaju dobru kompatibilnost sa svim polimerima, visoku čvrstoću, prozirnost, postojanost kemikalijama i nezapaljiva su. Staklenim vlaknima dobivaju se kompoziti dobrih mehaničkih svojstava, visoke dimenzijske stabilnosti i relativno niske cijene [2], [3], [6].

3.2.1.2.2. Ugljikova vlakna

Dobivaju se pirolizom umjetne svile (rejona), poliakrilonitrila (PAN) ili katrana. Ugljikova vlakna karboniziraju između 1200 °C i 1400 °C i sadrže 92 % do 95 % ugljika. Atomi ugljika raspoređeni su u dvije dimenzije u šesterokutne mreže. Nakon karboniziranja dobivaju dobra mehanička svojstva [2].

Ugljikova vlakna rabe se u oblicima pređa, vlakana duljine manje od 10 mm. Postoji više vrsta ugljikovih vlakana prema načinu nastanka: PAN vlakna, izotropna i anizotropna vlakna nastala od katrana, vlakna nastala od rejona i vlakna nastala od plina. Kao i kod staklenih vlakana, najbolja svojstva postižu se korištenjem kontinuiranih vlakana. Međutim kraćim ugljikovim vlaknima postiže se veće povišenje rasteznog modula i čvrstoće na štetu savojne čvrstoće. Ugljikovim vlaknima postižu se bolja mehanička svojstva u usporedbi sa staklenim i aramidnim vlaknima [3].

Prednosti ugljikovih vlakana su: visoka rastezna čvrstoća, visoki rastezni modul, visoka postojanost puzanju, dinamička izdržljivost, toplinska provodnost, niže su gustoće od staklenih vlakana, mali faktor trenja i mala toplinska rastezljivost. Nedostaci su im niska savojna žilavost, visoka cijena i niska postojanost abraziji [3].

3.2.1.2.3. Aramidna vlakna

Aramidna vlakna su aromatski poliamidi, od kojih su najpoznatija pod trgovačkim imenima *Nomex*, *Kevlar* i *Twaron*. Zbog svoje molekulne strukture imaju visoku toplinsku postojanost i odlična mehanička svojstva. Izvorno su u obliku kapljeviti kristala. Kada se otopina aramida ekstrudira u oblik vlakna dobiva se anizotropna struktura s velikim stupnjem orijentacije makromolekulnih lanaca u uzdužnom smjeru. U tom smjeru zato postoji viša čvrstoća i rastezni modul. Ova vlakna imaju visoku žilavost i nezapaljiva su. Nemaju konvencionalno talište, počinju se razgrađivati na zraku pri temperaturama oko 420 °C. Kemijska razgradnja moguća je jedino u jakim kiselinama ili lužinama u kombinaciji s UV zračenjem [2], [3].

Postoji nekoliko vrsta *Kevlar* vlakana, od kojih su važniji *Kevlar 29* (visoka žilavost), *Kevlar 149* (vrlo visoki rastezni modul) i *Kevlar 49* (visoki rastezni modul). *Kevlar 49* se najčešće koristi kod izrade konstrukcijskih kompozita. *Kevlar* dolazi u obliku vlakana ili strukova [2].

Prednosti aramidnih vlakana su visoka čvrstoća, visoki rastezni modul, visoka postojanost puzanju, niža cijena od ugljikovih vlakana, niža gustoća od staklenih i ugljikovih vlakana, niski faktor trenja i toplinskog rastezanja. Nedostaci su im veća vodoupojnost, osjetljivost na UV zrake i vanjske uvjete, niža toplinska svojstva i teža preradljivost [2], [3].

3.2.1.2.4. Borna vlakna [2]

Borna vlakna se proizvode postupkom kemijskog taloženja iz parne faze (e. *Chemical Vapour Deposition* (CVD)) i koriste se uglavnom za ojačanje matrica od epoksidne smole. Vlakna imaju visoku čvrstoću, krutost i nisku gustoću. Ako se površine vlakana kemijskim putem izglađe može se dobiti dvostruko viša rastezna čvrstoća. Primjenjuju se u zrakoplovnoj industriji i kod izrade sportske opreme.

3.2.1.2.5. Keramička vlakna [2]

Keramička vlakna su kristalasti materijali sastavljeni od raznih metalnih oksida, metalnih karbida, metalnih nitrida ili njihove kombinacije. Prva skupina keramičkih vlakana temeljena je na aluminiju (aluminijev oksid). Zbog svoje strukture imaju bolja svojstva u poprečnom smjeru u usporedbi s aramidnim vlaknima. Dostupna su u obliku vlakana ili tkanina. Imaju visoki rastezni modul, visoko talište i dobru postojanost koroziji.

Ostale vrste keramičkih vlakana su: silicijev nitrid, silicijev karbid, borov nitrid, aluminijev nitrid, kalijev titanat, kvarc i polikarbosilan. Vlakna polikarbosilana imaju mnogo bolja svojstva od oksidnih keramičkih vlakana (viši rastezni modul). Dobivaju se CVD postupkom. Vlakna silicijevog karbida imaju nešto nižu cijenu i koriste se uglavnom kod keramičkih i metalnih kompozita, a dostupna su kao viskeri.

3.2.1.2.6. Metalna vlakna [2]

Metalna vlakna mogu biti u obliku viskera, metalne vune i žice. Najčešće se koriste berilij, molidben, čelik i volfram. Njima se postižu visoka čvrstoća, visoki rastezni modul i žilavost kompozita. Uglavnom se primjenjuju kod metalnih kompozita, betona i kod ojačavanja automobilskih pneumatika.

3.2.1.2.7. Drvna vlakna [3]

U posljednje vrijeme sve je veći interes za korištenjem vlakana biljnog porijekla bilo u drvno-plastomernim kompozitima ili kao zamjena za neka od prije spomenutih vlakana. Najčešće se rabe drvna vlakna (bor, jasen, hrast), konoplja, juta, vlakna agave, ljuske riže i kukuruz. Ta vlakna nude brojne prednosti poput ekoloških i ekonomskih. Ona su postala nužnost budući da industrija kompozita traži sve veće količine staklenih vlakana. U usporedbi sa staklenim vlaknima njima se postiže manja proizvodnost, imaju niža mehanička svojstva, manju postojanost ujecaju vlage i okolišnim uvjetima. Prednosti su im niža gustoća, niža cijena, te lakše recikliranje.

3.2.1.3. Oblici vlakana

Vlakna se pojavljuju u nekoliko oblika koji se primjenjuju ovisno o željenim svojstvima kompozita i procesu prerade. Kod nekih proizvodnih postupaka vlakna su kontinuirana, a kod drugih su isječena na kraće dimenzije, obično od 3 mm do 50 mm [2].

U kontinuiranom obliku vlakna su najčešće dostupna u strukovima. Strukovi su slobodni, neuvijeni snopovi kontinuiranih vlakana koja su izvučena zajedno u paralelnim snopovima). Na strukovima je namotano od 12 do 120 snopova vlakana. Uže ili pređa je uvijeni skup vlakana. Namotavanje vlakana na strukove ili pređe vrši se prema različitim uzorcima namotavanja. Kombiniranjem tih namotanih oblika dobivaju se užad i pletiva [2].

Vlakna se najčešće pojavljuju u obliku tkanina budući da se njima postiže visok udio vlakana u kompozitu. Korištenjem tkanina s gušće isprepletenim vlaknima dobiva se veći udio vlakana u kompozitu. Manjim promjerima vlakana dobiva se veća površina

dodira vlakana i matrice. Time se postiže bolje vezanje i bolje prenašanje opterećenja što znači viša mehanička svojstva. S udjelom vlakana rastu krutost i čvrstoća, sve do udjela 60 % do 70 % kada krutost i dalje raste, ali čvrstoća počinje padati. Čvrstoća pri ovako visokim udjelima vlakana pada zbog toga što nedostaje matrice koja prenosi opterećenja i drži vlakna na mjestu. Masa vlakana mjeri se u jedinicama „tex” koja označava masu (u gramima) po 1000 m vlakna [5].

Prema orijentaciji, tkanine je moguće podijeliti u jednosmjerne tkanine, dvoosne, višeosne tkanine ili u obliku mata. Također postoje šivane tkanine i hibridne tkanine napravljene od različitih vlakana.

Jednosmjerne tkanine (e. *Unidirectional Fabrics*) imaju 90 % snopova vlakana orijentiranih u jednom smjeru. Kod njih su primarna vlakna orijentirana u smjeru 0° (uzdužni smjer, e. *warp*) ili u smjeru 90 ° (poprečni smjer, e. *weft*), a vezujuća vlakna nalaze se u drugim smjerovima povezujući primarna vlakna. Jednosmjernim tkaninama lakše se postiže odgovarajući udio vlakana u kompozitu. Vlakna se lakše smještaju na odgovarajuće pozicije pri čemu se postižu poboljšana svojstva u željenom smjeru, anizotropna svojstva. Nedostatak ovih tkanja su niža svojstva u poprečnom smjeru [7].

Dvoosne tkanine sastoje se od vlakana orijentiranih u uzdužnom (0°) i poprečnom (90°) smjeru. Ove tkanine dobivaju se ispreplitanjem uzdužnih i poprečnih vlakana u pravilnom uzorku. Integritet tkanine održan je preko uklinjenja vlakana i trenja među njima. Dvoosne tkanine mogu se proizvesti i šivanjem. Savitljivost tkanine, glatkoća površine i stabilnost ovise o uzorku tkanja. Postoji nekoliko uzoraka tkanja dvoosnih tkanina: obično, keper, saten, leno i mock leno [8].

Kod tkanine s običnim uzorkom (e. *plain*) poprečna vlakna prolaze naizmjenice ispod i iznad uzdužnih vlakana. Tkanina je simetrična, ima dobru stabilnost i poroznost. Ta tkanina u usporedbi s drugima ima nešto niža mehanička svojstva zbog toga što su vlakna dosta savijena. Iz tog razloga ovaj uzorak tkanja ne upotrebljava se za tkanja velike plošne mase [8].

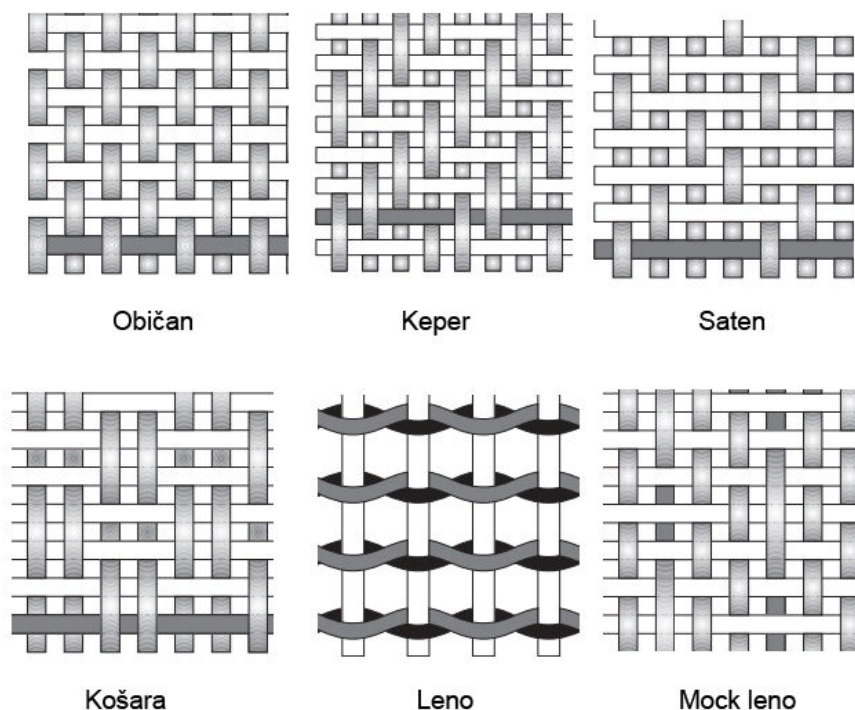
Kod tkanine s keper vezom (e. *twill*) jedno ili više poprečnih vlakana naizmjenice prolaze ispod i iznad jednog ili više uzdužnih vlakana. Dobiva se dojam dijagonale kada se gleda u tkaninu, pa se ovaj uzorak naziva i dijagonalni vez. Nešto manje je stabilna od obične tkanine, ali je veće poroznosti i smanjenog savijanja vlakana. Zbog toga ta tkanina ima glađu površinu i poboljšana mehanička svojstva [8].

Saten tkanina slična je keper tkanini, ali vlakna ne prolaze ispod i iznad svakog uzdužnog vlakna nego ispod svakih nekoliko vlakana prema određenom uzorku. Tako se dobiva struktura s manje ispreplitanja vlakana. Saten ima dobra mehanička svojstva, poroznost i savitljivost. Nedostatak mu je niža stabilnost i asimetričnost koja otežava preradu [8].

Tkanina s uzorkom košare (e. *basket*) slična je običnoj tkanini, a razlika je u tome što se isprepliću dva ili više vlakana. Ova tkanina manje je stabilna od obične, ali ima veću čvrstoću. Obično su to tkanine velike plošne mase [8].

Leno tkanina dobiva se ispreplitanjem susjednih poprečnih vlakana oko uzdužnih vlakana tako da poprečna vlakna čine spiralan par osiguravajući uzdužna vlakna na mjestu. Zbog dosta porozne strukture ta se tkanina koristi jedino u kombinaciji s drugim vrstama tkanina [8].

Mock leno tkanina slična je običnoj, ali kod nje poprečna vlakna prolaze ispod i iznad svakih nekoliko uzdužnih. Te tkanine obično su veće debljine, grublje površine i dobre poroznosti. Na 3.4 prikazani su uzorci tkanja [8].



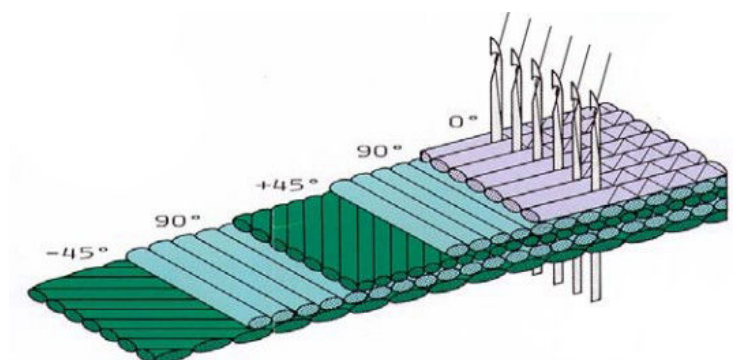
Slika 3.4. Uzorci tkanja [8]

Višeosna tkanja su tkanja kod kojih su vlakna orijentirana po više različitih kuteva. Ovdje spadaju dvoosne tkanine s orijentacijom $\pm 45^\circ$, troosne s orijentacijom $0^\circ/\pm 45^\circ$ i $90^\circ/\pm 45^\circ$, četveroosne s orijentacijom $0^\circ/90^\circ/\pm 45^\circ$. Vlakna tih tkanina povezuju se ljepilom ili češće šivanjem budući da se njime postiže bolja savitljivost [9].

Vlakna se mogu nalaziti i u obliku mata. To su slojevi proizvoljno orijentiranih vlakana povezanih vezivom. Vlakna se mogu nalaziti i u obliku priprema koji se koriste u procesu lijevanja. To su dvodimenzionalni matovi, preprezi koji su oblikovani u trodimenzionalne predoblike [2].

Šivane tkanine sastoje se od jednog ili više slojeva dugačkih vlakana koja su učvršćena sekundarnim materijalom, najčešće poliesterskom niti. Moguće je kombinirati više orijentacija vlakana kao i razne vrste vlakana. Šivane tkanine imaju bolja mehanička svojstva zbog toga što vlakna nisu savijena kao kod tkanja i zbog toga što može postojati više orijentacija vlakana. Također kod tih tkanina ne postoje točke naprezanja

koje postoje na sjecištima vlakana kod običnih tkanina. Druge prednosti tih tkanina su veća proizvodnost budući da su veće debljine i mogućnost postizanja finije strukture, odnosno više gustoće. Nedostatak je skupa, spora i složena proizvodnja, pojava grešaka poput nedostatka vlakna u strukturi čije mjesto kasnije u kompozitu zauzima smola. Proizvode se na dva načina: tkanjem i šivanjem i simultanim šivanjem više slojeva. Slika 3.5 prikazuje postupak simultanog šivanja slojeva različitih orijentacija [9].



Slika 3.5. Postupak simultanog šivanja [9]

Kod hibridnih tkanina korištena je kombinacija dvaju vrsta vlakana. Kombiniraju se ugljična i aramidna vlakna, staklena i aramidna, ugljična i staklena [8].

4. PRERADA POLIMERNIH KOMPOZITA

Postupci prerade polimernih kompozita dijele se na postupke mokrog laminiranja, postupke s otvorenim kalupom, postupke s zatvorenim kalupom, pultrudiranje, namotavanje filamenata i ostale postupke.

4.1. Načini objedinjavanja matrice i ojačavala [2]

Objedinjavanje polimerne matrice i ojačavala može se događati prije ili tijekom procesa proizvodnje u kojem kompozit poprima svoj konačan oblik. U drugom slučaju početni materijali dolaze odvojeno u proces i bivaju objedinjeni u kompozit tijekom proizvodnje. Primjer ovog slučaja je namotavanje i pultrudiranje kod kojih je ojačavalo u obliku kontinuiranih vlakana. U prvom slučaju početni materijali praoblikovani su u pripremak koji se koristi u procesu konačnog oblikovanja kompozita. Postoje dva procesa praoblikovanja kompozitnih pripremak, to su: smjese za kalupljenje i preprezi.

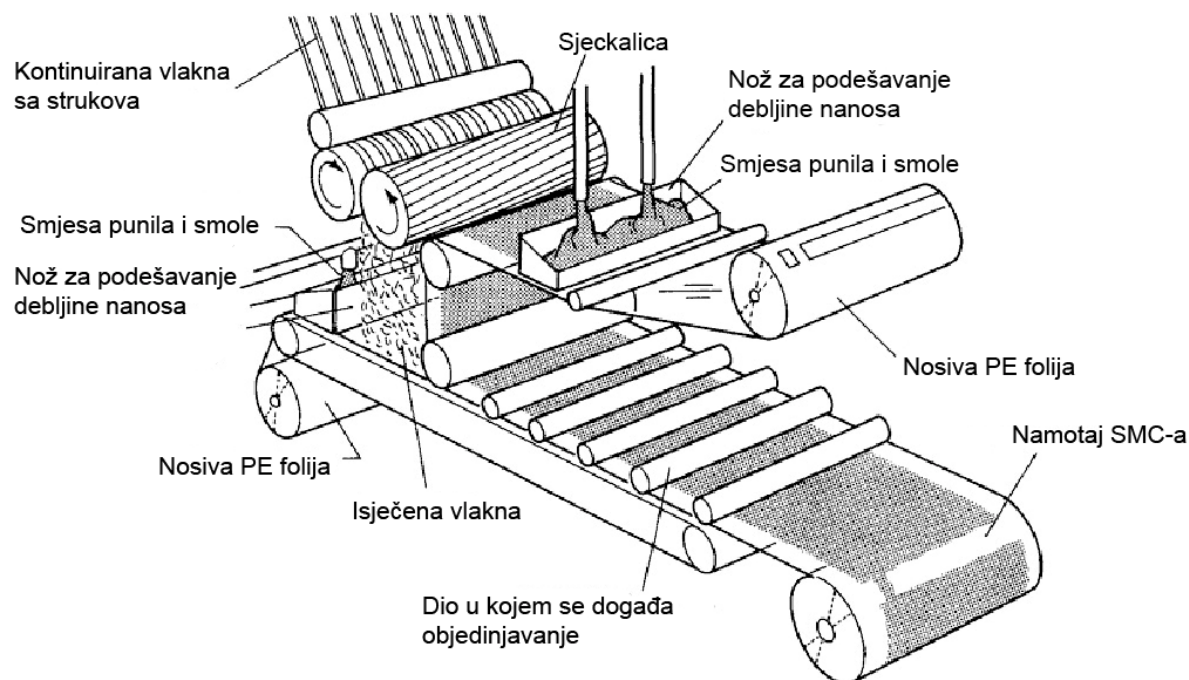
4.1.1. Smjese za kalupljenje [2]

Smjese za kalupljenje (e. *moulding compounds*) sastoje se od smola, punila i drugih dodataka poput ojačavala i pigmenata. Većina smjesa za kalupljenje sastavljena je od duromernih smola kao matrice i kratkih nasumično raspoređenih vlakana. Duromerne smole nalaze se u neumreženom stanju, a umreživanje se zbiva tijekom ili nakon oblikovanja proizvoda. One se koriste u postupcima poput injekcijskog prešanja ili izravnog prešanja za koje je potrebno osigurati dovoljnu tecljivost smjese. Smjese za kalupljenje pojavljuju se u nekoliko oblika, a to su: pločasti osmoljeni matovi, vlaknasti preprezi i debelopločasti osmoljeni matovi.

4.1.1.1. Pločasti osmoljeni matovi [2]

Pločasti osmoljeni matovi (e. *Sheet Moulding Compounds* (SMC)) smjesa su duromerne smole, dodataka i nasumično orijentiranih staklenih vlakana. Oni su zamotani u trake tipične debljine 6,5 mm. Najčešće se primjenjuje smola nezasićenog poliestera. Punila su obično mineralni prahovi poput talka, kremenog brašna i vapnenca. Staklena vlakna su duljine između 12 mm i 75 mm i zauzimaju do 30 % volumnog udjela kompozita.

Pločasti osmoljeni matovi vrlo su pogodni za rukovanje i daljnje rezanje u pripremk. Pojedini slojevi ovih matova odvojeni su polietilenskim folijama kako bi se ograničilo isparavanje određenih komponenti iz duromernih smola. Polietilenski sloj također poboljšava kvalitetu površine gotovog kompozitnog otpreska. Slika 4.1 prikazuje proizvodnju pločastih osmoljenih matova.



Slika 4.1. Proizvodnja pločastih osmoljenih matova [6]

Proizvodni proces pločastih osmoljenih matova počinje od spremnika smjese smole i dodataka koju nož za podešavanje debljine nanosa raspoređuje na nosivu polietilensku foliju. Nosiva folija s nanesenom smjesom prolazi ispod sjeckalice koja sjecka staklena vlakna na duljinu oko 25 mm. Nakon što staklena vlakna padnu na foliju sa smolom, druga folija s nanesenom smolom se dodaje na vrh tako da staklena vlakna ostaju zarobljena u sredini. Nakon namotavanja gotovog kompozita djeluju očvršćivala i kompozit postaje tvrdi. Mat se izrezuje na odgovarajuće dimenzije i ulaže u kalupe za izravno prešanje. Pri temperaturi od oko 150 °C i uz odgovarajući tlak SMC poprima oblik kalupne šupljine i aktivira se umreživalo koji započinje umreživanje kompozita.

Prednosti tih matova su: visoka proizvodnost, mali udio rada, malo otpada, mogućnost postizanja složenih oblika i smanjenje mase otpreska [2], [6].

4.1.1.2. *Vlaknasti preprezi* [2]

Vlaknasti preprezi (e. *Bulk Moulding Compounds* (BMC)) sastoje se od istih početnih materijala kao i pločasti osmoljeni matovi, ali smjesa duromera je u obliku svitaka, smotanih listova. Promjer tih svitaka je između 25 mm i 50 mm. Vlakna koja se koriste kod ovih kompozita obično su kraća, duljine između 2 mm i 12 mm zbog toga što je potrebna bolja tecljivost u postupcima kalupljenja kojima su namijenjeni. Postupak proizvodnje sličan je proizvodnji pločastih osmoljenih matova, ali se ekstrudiranjem postiže oblik listova koji se zatim namotavaju.

4.1.1.3. *Debelopločasti osmoljeni mat* [2]

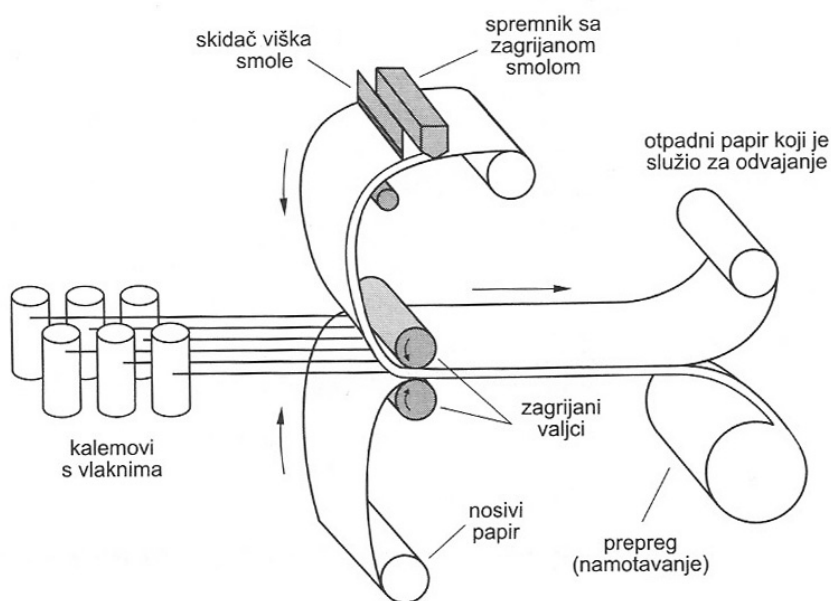
Debelopločasti osmoljeni matovi (e. *Thick Moulding Compounds* (TMC)) sastoje se od iste smjese duromerne smole i dodataka kao kod prethodnih kompozita. Također se primjenjuje i ista proizvodna oprema. Razlika je u debljini matova koja može biti i do 50 mm i duljini staklenih vlakana koja se kreće između 6 mm i 50 mm. Tijekom postupka proizvodnje smjesa potpuno očvršćuje pri čemu se postižu bolja mehanička svojstva i manja poroznost. Manja poroznost jamči bolju kvalitetu površine nego kod prethodna dva kompozita što znači da nema naknadne obrade otpreska.

4.1.2. *Preprezi*

Preprezi su oblici kompozita koji su sastavljeni od kontinuiranih jednosmjerno orijentiranih vlakana ili tkanih vlakana i određene količine neočvrsnute smole kao matrice. Udio smole kreće se od 30 do 80 %. Dobavljaju se u obliku svitaka ili ploča. Koriste se u zrakoplovnoj i drugim industrijama gdje su potrebni materijali dobrih svojstava [3].

Trenutno se najčešće primjenjuje kombinacija aramidnih, ugljikovih ili staklenih vlakana s epoksidnom, fenolnom ili poliimidnom smolom kao matricom. Postupci prerade preprega temelje se na impregniranju taljevine ili otopina. Kod taljevina film smole je

impregniran na vlakna uz pomoć temperature i pritiska. Kod impregniranja otopinama vlakna prolaze kroz otopinu smole, te zatim prolaze kroz kalendar. Na kraju ovi kompoziti prolaze kroz peći kako bi se uklonilo otapalo. Postupak s impregniranjem taljevine prikazan je na slici 4.2 [2].



Slika 4.2. Postupak s impregniranjem taljevine [1]

Oblikovljivost, ljepljivost, tecljivost smole i vrijeme umreživanja mogu se prilagoditi željenim proizvodnim postupcima. Prema strukturi postoje tri vrste preprega: jednosmjerno orijentirani, tkani i preprezi sa snopovima neupredenih niti. Preprezi s jednosmjerno orijentiranim nitima dostupni su u širinama od 25 mm do 1500 mm i debljine očvrnutog sloja od 0,05 mm do 0,5 mm. Ti preprezi namotavaju se u smjeru vlakana. Proizvodnja je nešto skuplja budući da je potrebna oprema za odmotavanje prije ulaganja u kalup. Preprezi s tkanim vlaknima isporučuju se u širinama do 1800 mm i debljine očvrnutog sloja od 0,01 mm do 0,8 mm. Uzorci tkanja variraju, ovisno o željenim svojstvima kompozita. Preprezi sa snopovima neupredenih niti isporučuju se u svicima u kakvima dolaze i vlakna. Koriste se za namotavanje filamenata budući da pružaju uštede u njihovoj proizvodnji [2].

Preprezi se koriste u zrakoplovnoj i vojnoj industriji kod izrade zrakoplova, raketa, satelita i drugih proizvoda gdje su mala gustoća i dobra mehanička svojstva od velike važnosti. Također se koriste kod proizvodnje sportskih proizvoda poput teniskih reketi i palica za golf [2].

4.2. Postupci s otvorenim kalupom [2]

Kod ovih postupaka koristi se samo jedna površina kalupa. Kalup može biti pozitivne ili negativne orijentacije. Kao matrice najčešće se koriste duromerne smole poput epoksidne ili poliesterske, a kao ojačavalo vlakna E-stakla. Smola i vlakna se nanašaju u slojevima sve dok se ne dosegne željena debljina. Vlakna se nalaze u obliku matova, strukova ili užeta. Korištenje preprega može pojednostaviti postupak. Nakon nanašanja slojeva smole i vlakana slijedi proces umreživanja.

Postupci s otvorenim kalupom imaju niz prednosti pred onima sa zatvorenim: potrebna je samo jedna strana kalupa (niža cijena), mogućnost dobivanja vrlo velikih i složenih oblika, može se koristiti veći raspon različitih kompozitnih materijala.

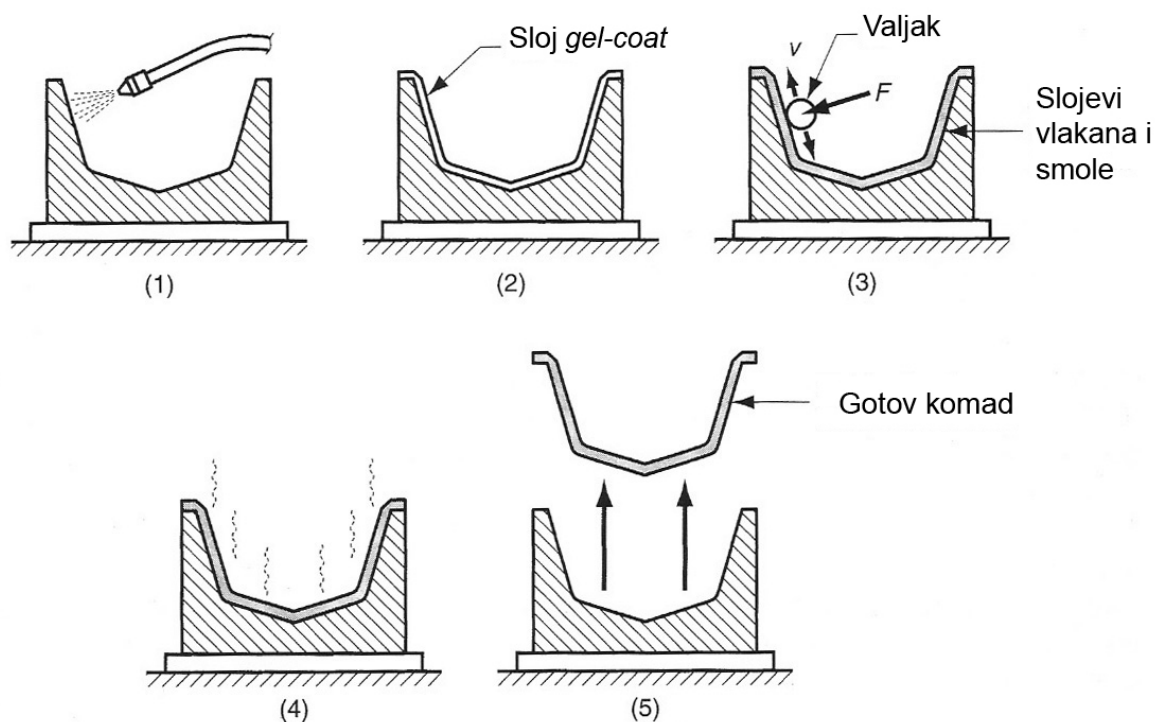
Nedostatak je taj što je samo jedna površina izratka glatka, s čim je povezana i skupa priprema površine kalupa koja mora biti visoke kvalitete. Kod postupaka s otvorenim kalupima potrebno je uložiti dosta rada kod polaganja slojeva smole i vlakana, što povlači za sobom potrebu za kvalificiranim radnicima. U zadnje vrijeme uvode se roboti kojima se postiže veća kvaliteta i proizvodnost. Nedostatak je i dulje vrijeme umreživanja zbog izradaka velikih dimenzija koje je teže toplinski obraditi.

4.2.1. Postupci mokrog laminiranja

4.2.1.1. Dodirni postupak laminiranja

Dodirni postupak laminiranja (e. *Hand Lay-up*) ili ručni postupak najstariji je način laminiranja u otvorenim kalupima. Kod ovog postupka slojevi smole i vlakna ručno se nanose na površinu otvorenog kalupa. Vlakna dolaze u obliku matova, kratkih vlakana, tkanih strukova, pređa ili tkanina. Postupak se može raščlaniti na pet koraka: čišćenje, nanašanje *gel-coata*, nanašanje slojeva smole i vlakana, umreživanje i skidanje komada

sa kalupa. Koraci postupka vidljivi su na slici 4.3. Nakon skidanja gotovog izratka potrebno je još odstraniti srh sa rubova i obraditi ih. Na površinu kalupa prije nanašanja smole nanaša se sloj odvajala, a potom posebnog *gel-coata* kako bi se olakšalo skidanje komada i postigla bolja kvaliteta površine. *Gel-coat* može sadržavati pigmente kojima se postiže željena boja površine. *Gel-coat* služi i kod povećanja postojanosti na starenje, kemijskog ili mehaničkog utjecaja. Svaki sloj smole mora se ručno razvaljati valjkom kako bi se smola što bolje impregnirala s vlaknima i kako bi se uklonili mjehurići zraka. Mora se osigurati dobro vlaženje vlakana smolom. Smola se nanosi kistom ili pištoljem za štrcanje. Kist se danas manje koristi, uglavnom kod manjih serija. Završni sloj smole ima zaštitnu funkciju [2], [3].



Slika 4.3. Koraci dodirnog postupka [2]

Treći korak ovog postupka može se automatizirati korištenjem posebnih strojeva za polaganje slojeva. Na strojevima se nalaze svici s kojih se odmataju vlakna. Vlakna prolaze kroz smjesu smole i umreživala i zatim prolaze kroz valjke. Razmak između valjaka može se namjestiti, čime se određuje debljina nanešenog sloja i količina smole. Valjci se gibaju po površini kalupa sve dok nije nanešena dovoljna debljina smole i

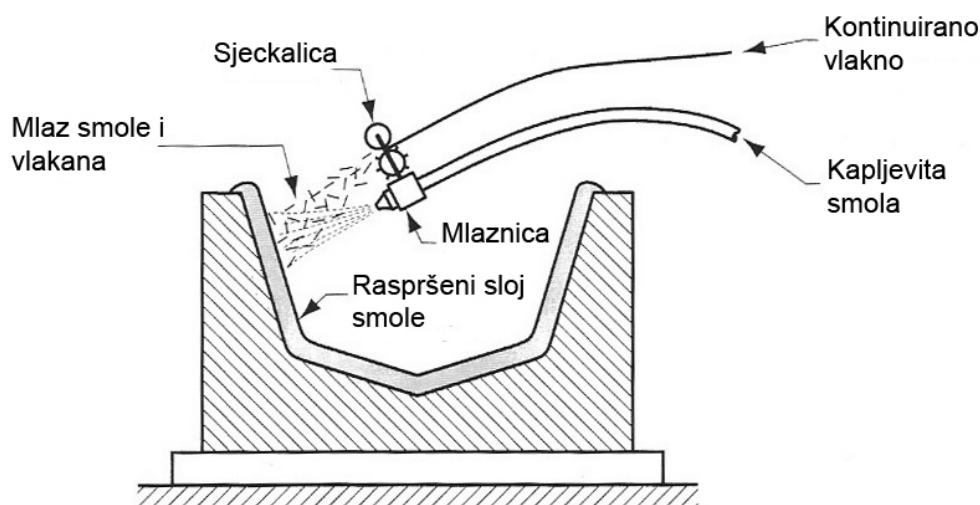
vlakana. Ovim strojevima moguće je održati željeni omjer smole i vlakana konstantnim, a time se postiže ujednačenija kvaliteta. Pogodni su za veće proizvode jednostavnijih oblika. Nedostatak im je nužnost programiranja budući da su upravljani računalom [2].

Umreživanje se najprije vrši pri sobnoj temperaturi, a zatim kada je kompozit dovoljno očvrstnuo može se nastaviti u skladištu. Održavanjem konstantne, povišene temperature (70 °C) može se ubrzati postupak umreživanja [3].

Prednosti tog postupka su jeftini kalupi i alati, mogućnost postizanja kompliciranih oblika i velikih dimenzija. Dodatne uštede mogu se postići kalupima od plastomernih kompozita ojačanim staklenim vlaknima. Ovi kalupi pogodni su za manje serije i izradu prototipova. Nedostaci su dugotrajnost postupka, male serije (do 1000 komada godišnje), gruba površina, utjecaj vještine radnika na kvalitetu, te veliki udio ljudskog rada [3].

4.2.1.2. Raspršivanje [2]

Raspršivanje (e. *Spray-up*) ili dodirni postupak sa štrcanjem je još jedna alternativa automatizacije izvođenja trećeg koraka kod mokrog laminiranja. Kao što je vidljivo na slici 4.4, kod tog postupka isječena vlakna pomiješana sa smolom raspršuju se po površini kalupa s pomoću posebnog raspršivala. Štrcanje se nastavlja sve dok se ne postigne odgovarajuća debljina. Raspršivanje se može primjeniti i kod nanašanja *gel-coata* u drugom koraku. Oprema uključuje pištolj za štrcanje, sjeckalicu vlakana i sustav dobave. U sjeckalicu se dobavljaju kontinuirana vlakna koja se sjeku na duljine između 25 mm i 75 mm. Ta se vlakna dodaju mlazu smole koji izlazi iz mlaznice pištolja. Tim načinom miješanja vlakana i smole postiže se slučajan raspored vlakana, dok se kod ručnog kalupljenja može postići struktura s orijentiranim vlaknima koja ima višu čvrstoću. Zbog ograničenja u postupku miješanja smole i vlakana, kod tog postupka se udio vlakana kreće između 30 % i 35 %. Kod ručnog postupka moguće je postići veći udio vlakana koji se kreće između 65 % i 70 %.



Slika 4.4. Raspršivanje [2]

Ovisno o načinu smješavanja smole i umreživala postoje četiri vrste pištolja za štrcanje. Najpovoljniji su pištolji s unutarnjim smješavanjem kod kojih smola i umreživalo dolaze odvojeno u komoru glave pištolja gdje se smješavaju, nakon čega izlaze iz mlaznice. Kod tih pištolja moguće je ostvariti kontinuirani omjer smole i umreživala čime se postižu viša kvaliteta i uštede na smoli. Nakon štrcanja potrebno je ručno ili automatizirano s pomoću stroja razvaljati nanešeni sloj [2].

Prednosti tog postupka pred ručnim postupkom su manji udio ljudskog rada, lakše rukovanje opremom i veća brzina. Kod tog postupka moguće je potpuno automatizirati postupak nanašanja smole i vlakana čime se postiže viša kvaliteta i sigurnost za radnika koji se ne treba izlagati štetnim parama smola. Nedostaci su investicija u opremu za štrcanje, gubici smole tijekom štrcanja, teže postizanje jednolične debljine, ograničenje na male serije (do 1000 komada godišnje), te gruba vanjska površina [2], [3].

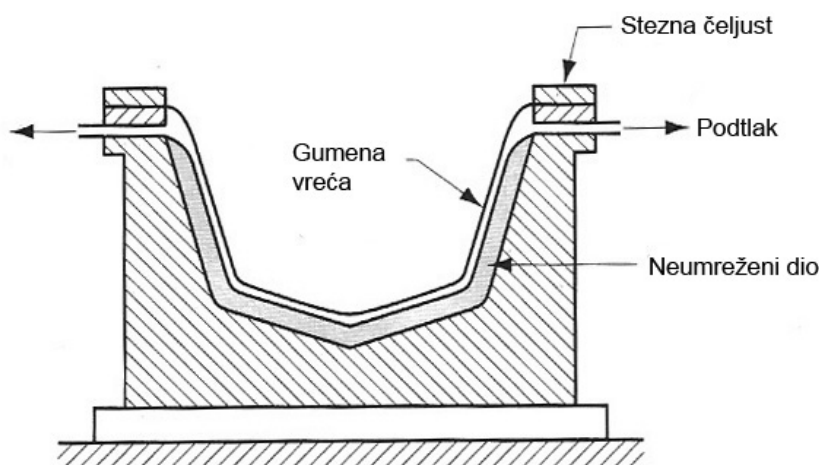
4.2.2. Prešanje gumenom vrećom

Cilj prešanja gumenom vrećom (e. *Bag Moulding*) je ostvarivanje kompaktne strukture nakon postupaka mokrog laminiranja. Zaostali mjehurići zraka pod pritiskom se istiskuju

iz neumrežene smole. Postoje tri vrste postupka: prešanje gumenom vrećom s pomoću podtlaka, prešanje gumenom vrećom s pomoću pretlaka i hidroformiranje [2].

4.2.2.1. Prešanje gumenom vrećom s pomoću podtlaka

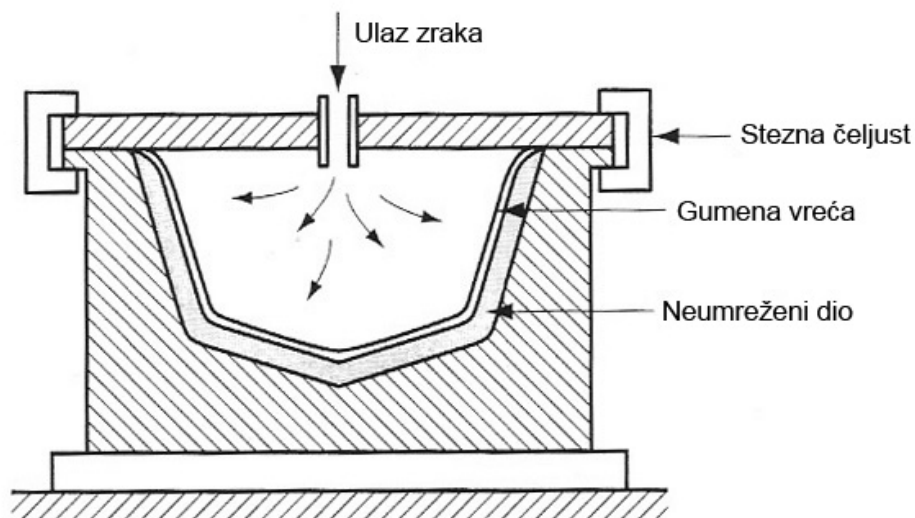
Kod tog postupka laminirani sloj na otvorenom kalupu pokriven je sa poliamidnom ili sličnom gumenom vrećom. Nakon zatvaranja rubova otvorenog kalupa podtlačno se pritišće vreća na laminirani sloj. Time se postiže kompaktnija struktura i bolje prijanjanje slojeva. Prednost tog postupka je postizanje bolje kvalitete vanjske površine i lakše otplinjavanje mjehurića zraka. Nedostatak je korištenje posebne opreme za stvaranje podtlaka i krojenje vreće prema obliku kalupa. Postupak je prikazan na slici 4.5 [2], [3].



Slika 4.5. Prešanje gumenom vrećom s pomoću podtlaka [2]

4.2.2.2. Prešanje gumenom vrećom s pomoću pretlaka [2]

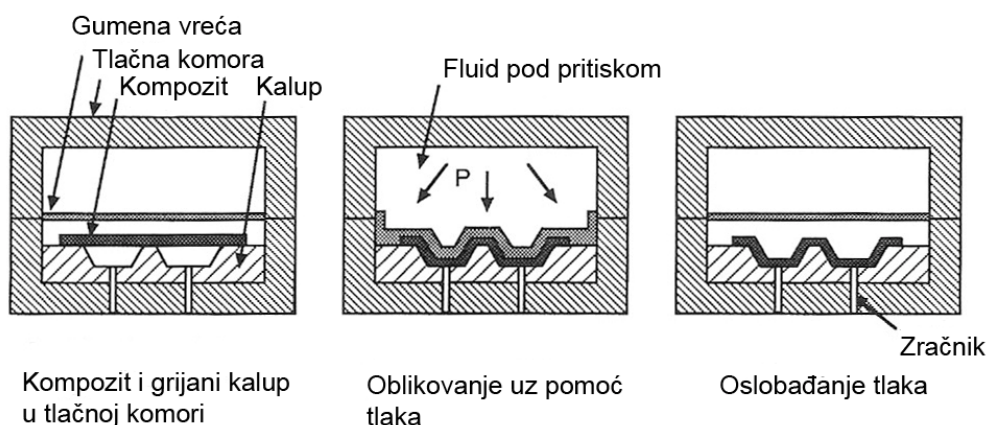
Razlika u odnosu na prethodni postupak je ta što se stlačenim zrakom u vreći postiže pritisak na sloj smole i vlakana. Tim postupkom moguće je postići i do tri puta viši tlak nego kod prethodnog procesa i iznosi oko 300 kPa. Također umjesto zraka može se koristiti i para pod tlakom čime se ubrzava umreživanje. Prednosti i nedostaci slični su kao i kod prethodnog postupka. Postupak je prikazan na slici 4.6.



Slika 4.6. Prešanje gumenom vrećom s pomoću pretlaka [2]

4.2.2.3. Hidroformiranje [10]

Postupak hidroformiranja (e. *Hydroforming*) sličan je prethodnom postupku ali se umjesto zraka koristi hidraulička tekućina. Hidraulička tekućina pod tlakom pritišće vreću i slojeve smole i vlakana. Tim postupkom smanjuje se savijanje vlakana i nabiranje. Nedostaci su niže temperature postupka i potreba za dodatnim zaštitnim gumenim slojem koji osigurava kompozit u slučaju puknuća vreće. Postupak je prikazan na slici 4.7.



Slika 4.7. Hidroformiranje [10]

4.2.3. Izravno prešanje u zatvorenom kalupu nakon mokrog laminiranja

Nakon mokrog laminiranja ručnim postupkom ili štrcanjem, obje strane kalupa prije umreživanja spajaju se pritiskom. Prednosti tog postupka su postizanje bolje kvalitete unutarnje i vanjske površine ako se *gel-coat* nanosi na obje strane kalupa, veći pritisak kojim se osigurava manje šupljina, mogućnost postizanja debljih presjeka. Nedostaci su skuplji kalupi, više ljudskog rada, dugotrajnost, ograničenje veličine dijelova veličinom preše, rizici u gubljenju orijentacije vlakana [2], [3].

4.2.4. Umreživanje [2]

Tijekom četvrtog koraka mokrog laminiranja smola umrežuje u čvrsto stanje. Temperatura i tlak utječu na umreživanje. Umreživanje se ubrzava povišenjem temperature pri čemu postoji nekoliko načina dovođenja topline. Ovisno o dimenzijama i svojstvima kompozita koriste se peći, infracrveno zračenje i autoklav.

4.2.5. Autoklavno praoblikovanje [2]

Autoklav je posebna komora pod pritiskom u kojoj se vrši umreživanje. Autoklavno praoblikovanje (e. *Autoclave Moulding*) obuhvaća korištenje preprega, ali se u autoklavima može vršiti umreživanje drugih kompozita dobivenih mokrim laminiranjem ili umreživanjem kaučukove smjese. U autoklavima se nalaze dušik, ugljični dioksid ili njihova mješavina sa zrakom pod tlakom do maksimalnih 15 MPa. Autoklavi su grijani s pomoću plinskih plamenika ili električnih grijala do maksimalne temperature 700 °C. Računalnim upravljanjem parametara autoklava mogu se postići odgovarajući ciklusi umreživanja.

Kod autoklavnog praoblikovanja koriste se preprezi sa staklenim, ugljikovim, aramidnim, plastomernim vlaknima, bornim vlaknima, te vlaknima silicij karbida i aluminij oksida. Matrice su izrađene od duromernih smola poput smole poliestera, epoksidne smole, poliimidne, fenolne; i od plastomernih poput PPS, PEEK, PEI, PAI. Najčešće se rabe epoksidne, fenolne i bismaleimidne smole.

Početni prepreg je u djelomično umreženom stanju i sadrži oko 42 % smole. Tijekom kalupljenja određena količina smole istječe iz preprega pri čemu se uklanjaju zaostali mjehurići zraka i otopine. Nakon umreživanja kompozit se sastoji od približno 60 % vlakana koliko iznosi norma za kompozite u zrakoplovnoj industriji.

Postupak započinje isjecanjem trake preprega u željeni oblik, zatim se vrši ulaganje preprega u valjano orijentiranim slojevima. Prepreg se preša gumenom vrećom uz pomoć podtlaka unutar autoklava. Preprezi umrežuju pod tlakom i temperaturom kojima se postiže odgovarajuće istiskivanje viška smole iz slojeva i što kraće vrijeme umreživanja. Umreživanje traje oko 6 sati od kojih se u prvom satu pri temperaturi od oko 125 °C pod tlakom istiskuje smola, a ostatak vremena vrši se umreživanje pri oko 175 °C.

Taj postupak koristi se uglavnom u zrakoplovnoj industriji zbog postizanja visoke kvalitete i točnosti dimenzija. Nedostaci su potreba održavanja stalnog tlaka i temperature, dugotrajnost postupka, veliki udio rada, neprikladnost serijske proizvodnje i potreba za dodatnim materijalima.

4.3. Postupci sa zatvorenim kalupom

Postupci sa zatvorenim kalupom dosta su česti kod proizvodnje kompozita. Dije se na postupke posrednog prešanja, izravnog prešanja i injekcijskog prešanja.

4.3.1. Izravno prešanje

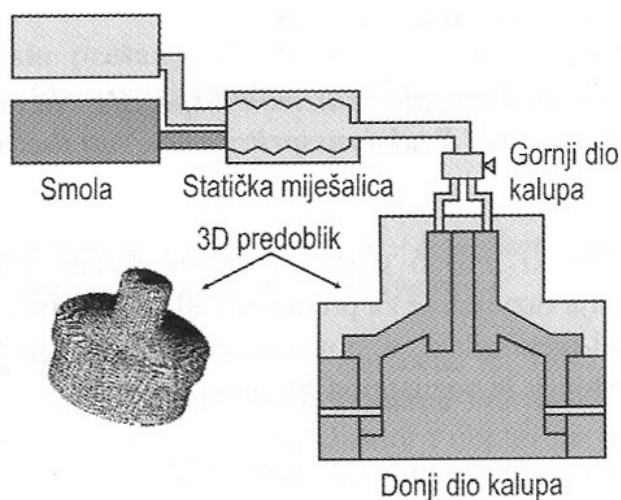
Postoji hladno i toplo izravno prešanje kompozita ovisno o tome je li kalup zagrijavan. Kod hladnog izravnog prešanja kalup se najprije premazuje odvajalom i *gel-coatom*. Zatim se ulaže preodoblik od tkanine koji služi kao ojačavallo. Nakon toga u kalup se ulijeva odgovarajuća količina smole nakon čega se kalup zatvara. Smola zatim umrežuje pri sobnoj temperaturi. Prednosti tog procesa su dobra kvaliteta otpresaka, nema grijanja kalupa, sile držanja kalupa su niske što pojeftinjuje proizvodnju. Nedostaci su niža proizvodnost [2], [3].

Kod toplog izravnog prešanja pločasti osmoljeni matovi (SMC), vlaknasti preprezi (BMC) ili debelopločasti osmoljeni matovi (TMC) ulažu se u grijani kalup preše za izravno prešanje. Tlakom i povišenim temperaturama postiže se tečenje smjese smole i vlakana u kalupu. Smjer tečenja određuje orijentaciju vlakana. Nakon što je kalupna šupljina popunjena slijedi umreživanje pri čemu je kalup još uvijek pod tlakom. Nakon što je postignut dovoljan stupanj umreženja otpresci se vade iz kalupa i umreživanje se može nastaviti u pećima. Otpresci su visoke krutosti i čvrstoće i imaju visoku kvalitetu površine, a sam postupak je pogodan za masovnu proizvodnju. Nedostaci su skupi strojevi i kalupi, potreba za pripremom i pravilnim umetanjem pripremaka [2], [3].

Ti postupci koriste se u automobilske industriji kod proizvodnje elemenata branika, vrata, krovova, u elektroničkoj industriji kod proizvodnje kutija i kućišta [2], [3].

4.3.2. Posredno prešanje

Injekcijsko-posredno prešanje kapljevite smole s uložnim trodimenzionalnim predoblikom (e. *Resin Transfer Moulding (RTM)*) obuhvaća proces u kojem se kapljevita smola dobavlja iz spremnika u kalupnu šupljinu u koju je umetnut predoblik od tkanine. Metalni kalup smješten je u prešu za izravno prešanje kojom se mogu ostvariti odgovarajuće sile držanja od oko 6000 kN. U otvoreni, grijani kalup ulažu se trodimenzionalni predoblici koji služe kao ojačavalo i lakšem širenju smole u kalupu. Koriste se nezasićene poliesterske smole, epoksidne smole i fenolne smole s umreživalima. Pretlak smole koja ulazi u kalup iznosi oko 7 bara. Uobičajeni udio smole je 70 %. Sam ciklus traje relativno brzo, oko 15 minuta budući da grijani kalup ubrzava umreživanje. Na slici 4.8 prikazan je RTM postupak [2], [11].



Slika 4.8. RTM postupak [11]

Postoji niz inačica ovog procesa od kojih su neke: injekcijsko prešanje s više uljevnih sustava (e. *Multiple Port Injection (MPI)*), podtlačno injekcijsko prešanje kapljevite smole s uložnim trodimenzionalnim predoblikom (e. *Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding (VARTM)*), sekvencijsko injekcijsko prešanje (e. *Sequential Multiple Port Injection (SMPI)*), injekcijsko izvlačenje duromernih kompozita (e. *Injection-compression System for Thermoset Composites (ICS)*), injekcijsko-posredno prešanje kapljevite smole sa savitljivom dijafragmom i krutim postoljem (e. *Supported Mould Assisted Resin Transfer Moulding (SMARTM)*) [11].

Ovaj postupak je vrlo ekonomičan, pogodan za proizvodnju srednje velikih serija (deseci tisuća) kompozitnih otpresaka dobrih svojstava. Da bi se postupak dalje unaprijedio potrebno je razviti tehnologiju proizvodnje predoblika. RTM postupak polako zamjenjuje autoklavne postupke kod proizvodnje sportske opreme i u zrakoplovnoj industriji [2].

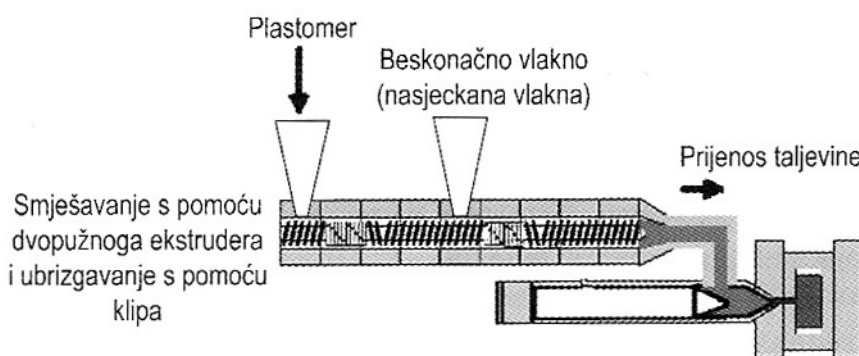
4.3.3. Injekcijsko prešanje

Injekcijsko prešanje vlaknima ojačanih plastomernih smjesa česti je postupak proizvodnje kompozitnih izradaka. Glavna prednost injekcijskog prešanja su visoka proizvodnost i visoki stupanj automatizacije. Injekcijski se mogu prešati plastomerne taljevine koje sadrže vlakna i punila ili duromerne smole ojačane vlaknima. Postoji

nekoliko inačica tog procesa ovisno o tome je li se injekcijski preša smjesa smole, vlakana i ojačavala ili se smola injekcijski preša u kalup u kojem se nalazi tkanina kao ojačavalo [2].

Inačice procesa su: injekcijsko prešanje vlaknima ojačanih plastomernih taljevina, reakcijsko injekcijsko prešanje ojačanih tvorevina (e. *Reinforced Reaction Injection Moulding (RRIM)*), reakcijsko injekcijsko prešanje integralnih pjenastih duromernih otpresaka s predoblikovanim ojačavalom (e. *Structural Reaction Injection Moulding (SRIM)*). Ti postupci koriste se u automobilskoj industriji kod izrade komponenata branika, vrata i šasije [2].

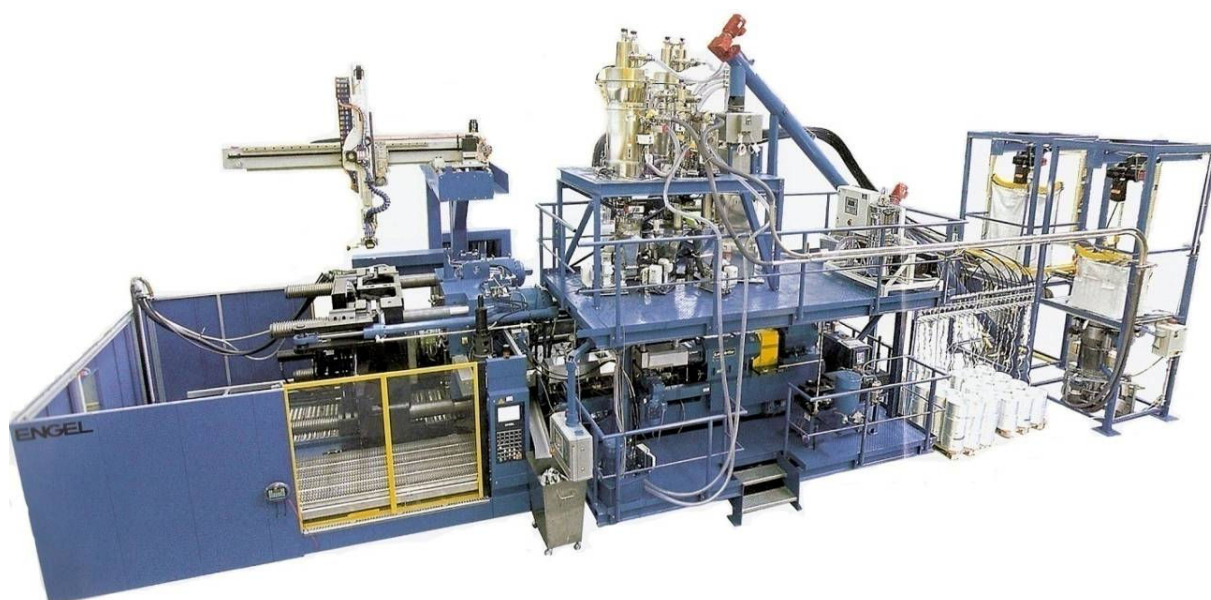
Injekcijsko prešanje vlaknima ojačanih plastomernih taljevina vrši se na dvije odvojene jedinice od kojih jedna služi oplemenjivanju i pripremi taljevine, a druga injekcijskom prešanju. One su povezane tokom taljevine. Prva jedinica je dvopužni ekstruder u kojem se u taljevinu dodaju vlakna i dodaci. Tijekom procesa nema djelovanja naknadnog tlaka i snižena je orijentacija vlakana. Može doći do sniženja žilavosti uslijed oštećenja i toplinske razgradnje vlakana prilikom pripreme taljevine. Slika 4.9 prikazuje postupak injekcijskog prešanja vlaknima ojačanih plastomernih taljevina [11].



Slika 4.9. Injekcijsko prešanje vlaknima ojačanih plastomernih taljevina [11]

Tvrtka *Engel* razvila je posebnu liniju za injekcijsko prešanje vlaknima ojačanih plastomernih taljevina. Linija se sastoji od dvopužnog ekstrudera za pripremu taljevine,

ubrizgavalice, sustava za dobavu i miješanje plastomera i dodataka. Ekstruder priprema taljevinu i potrebnu količinu taljevine prenosi u cilindar ubrizgavalice. Za vrijeme dok ubrizgavalica ubrizgava taljevinu u kalup ekstruder dalje priprema taljevinu. Poseban dodatak liniji čini sustav za dobavu 24 snopova staklenih vlakana koja se dobavljaju i sjeckaju na posebnoj platformi iznad ekstrudera. Time se osigurava precizno dodavanje vlakana u taljevinu i pažljivo rukovanje vlaknima. Budući da se vlakna manje oštećuju, moguće je postići veću duljinu vlakana u kompozitu. Ta linija prikazana je na slici 4.10 [12].



Slika 4.10. *Engelova* linija za injekcijsko prešanje vlaknima ojačanih plastomernih taljevina [12]

Kod RRIM postupka injekcijski se preša smjesa smole ojačana staklenim vlaknima. Smola i umreživalo koji dolaze iz odvojenih spremnika se prethodno miješaju, a reakcija umreživanja događa se u kalupu. Kod SRIM postupka suha tkanina koja služi kao ojačavalno se ulaže u kalup prije ubrizgavanja smole. Prednosti tih postupaka su automatiziranost doziranja i miješanja, dobra kvaliteta površine, prikladnost za srednje velike serije i umjereni troškovi rada. Nedostaci su potrebna investicija u stroj i kalup, rizik krivog ulaganja tkanine, te ograničenost veličine otpreska veličinom stroja [3].

4.4. Namotavanje filamenata [2]

Namotavanje filamenata (e. *Filament Winding*) relativno je jednostavan postupak kod kojeg se kontinuirana vlakna koja služe kao ojačavalo namotavaju na rotirajuću jezgru i zatim umrežuju tvoreći zatvorene šuplje oblike. Vlakna se namotavaju na jezgru u ponavljajućim uzorcima, u više slojeva.

Najčešće se koriste staklena, ugljikova i aramidna vlakna. Najzastupljenija su staklena vlakna i to vlakna E-stakla i S-stakla. Vlakna od E-stakla češće se koriste od ostalih tipova zbog svoje niske cijene, dok se vlakna od S-stakla koriste tamo gdje su potrebna bolja mehanička svojstva. Ugljikova i aramidna vlakna imaju bolja mehanička i toplinska svojstva od staklenih pa se češće koriste u zrakoplovnoj i vojnoj industriji. Negativnost aramidnih vlakana velika je vodoupojnost što negativno utječe na svojstva kompozita. Vlakna se mogu prevlačiti tankim slojevima polimera poput silana kako bi se zaštitila tijekom prerade, spriječilo upijanje vode i poboljšalo vezanje sa smolom što znači poboljšanje mehaničkih svojstava.

Kao matrice mogu se koristiti plastomeri i duromeri, od kojih se najčešće rabe duromerne smole poput epoksidne i smola poliestera i vinilestera. Rijeđe su korištene fenolne i polimidne smole zbog više cijene i težeg rukovanja. Epoksidne smole češće se koriste tamo gdje su potrebna dobra mehanička svojstva, u zrakoplovnoj industriji. Jeftinija poliesterska smola koristi se u izradi komercijalnih proizvoda. Smole moraju imati dovoljno nisku viskoznost kako bi se postiglo što bolje vlaženje vlakana. Udio umreživala mora biti pažljivo odabran i kontroliran tijekom procesa kako ne bi došlo do umreženja smole tijekom namotavanja vlakana.

Ovisno o tome prolaze li vlakna kroz smolu prije namotavanja ili se koriste vlakna preprega razlikuje se mokro i suho namotavanje. Rijeđe se koristi postupak kod kojeg se najprije vrši namotavanje vlakana na jezgru i zatim se impregnira smolom, ovaj postupak je poznat kao naknadno impregniranje.

Kod suhog namotavanja, namotavaju se preprezi koji su namotani na svitke. Oni se namotavaju bez prethodnog prolaska kroz kupku smole. Namotavanje preprega daje dobra svojstva kompozita i lako kontroliranje postupka. Nedostaci preprega su viša cijena i potreba za posebnim uvjetima skladištenja kako ne bi došlo do prijevremenog umreženja. Ti preprezi sadrže dodatke poput otapala i dodataka za konzerviranje koji održavaju predumreženo stanje. Umreživanje preprega vrši se u autoklavu.

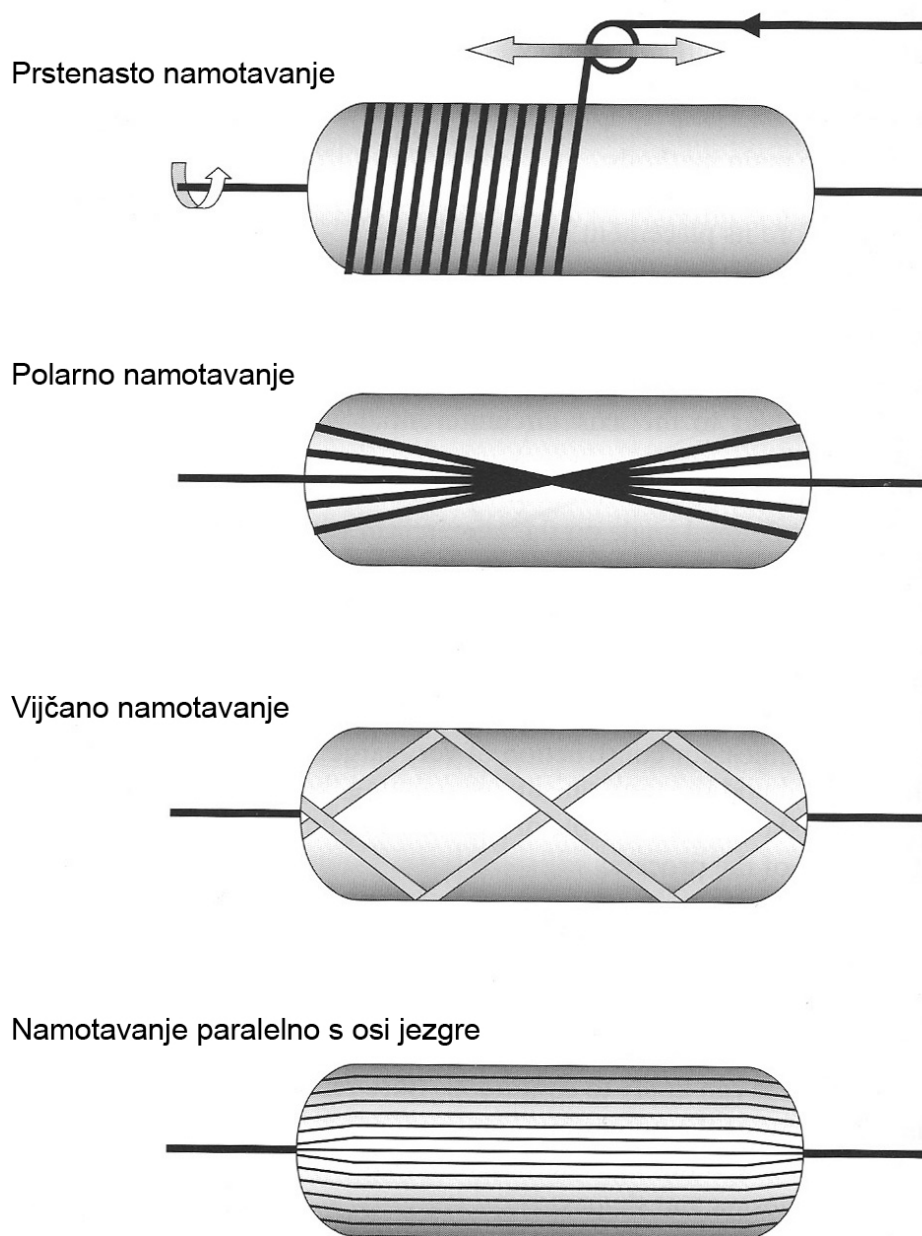
Mokro namotavanje češće se primjenjuje od suhog. U tom slučaju vlakna prije namotavanja prolaze kroz kupku smole ili valjke natopljene smolom. Kako bi se povećala viskoznost smole, odnosno vlaženje vlakana, kupka smole se grije. Kontrola nanešenog sloja smole je otežana, a udio smole ovisi o viskoznosti, vlaženju, brzini namotavanja, te naprezanju vlakana. Taj proces jeftiniji je od suhog namotavanja, ali ga nije lako kontrolirati. Umreživanje se vrši u pećima ili pri sobnoj temperaturi.

Postupak namotavanja može se raščlaniti na četiri koraka: priprema vlakana i jezgre, namotavanje, umreživanje i uklanjanje jezgre.

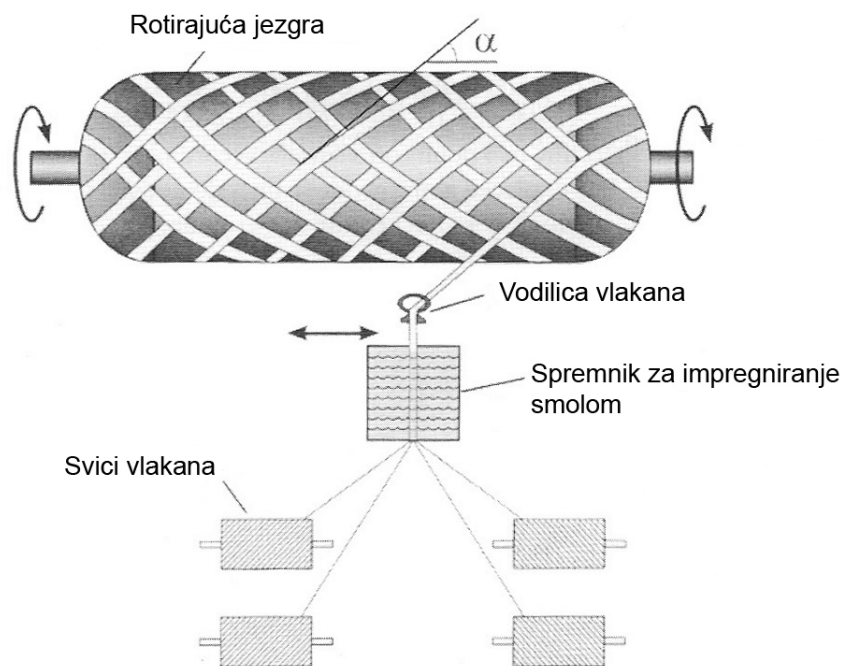
Priprema obuhvaća stavljanje svitaka vlakana i jezgri na stroj za namotavanje. Jezgra se oblaže slojem gela kojim se kasnije olakšava izvlačenje jezgre. Postoji više vrsta jezgri ovisno o načinu skidanja filamenta. Jezgre se najčešće izrađuju od čelika ili aluminija pri čemu se mora osigurati lagano skidanje komada. Postoje i one za jednokratnu upotrebu koje se uništavaju kako bi se oslobodio komad.

Namotavati se može prstenasto (po obodu), polarno, paralelno s osi jezgre i vijčano. Na slici 4.11 prikazana su četiri osnovna uzorka namotavanja. Najčešće se primjenjuje polarno i vijčano namotavanje. Kod polarnog namotavanja jezgra miruje, a ruka stroja za namotavanje rotira oko uzdužne osi, nagnuta pod određenim kutem. Kada se ruka jednom okrene oko osi jezgra se zarotira za debljinu vlakna. Ovaj postupak se ponavlja u pozitivnim i negativnim nagibima ruke sve dok se ne postigne željena debljina. Kod vijčanog namotavanja jezgra se kontinuirano okreće, a ruka stroja giba se naprijed i nazad određenom brzinom uzduž osi jezgre. Kod tog načina namotavanja potrebno je

više prolaza kako bi se pokrila površina jezgre zbog toga što se vlakna ne nalaze jedna uz drugo. Na slici 4.12 prikazano je vijčano namotavanje. Postoji i kombinacija tih načina namotavanja [2], [3].

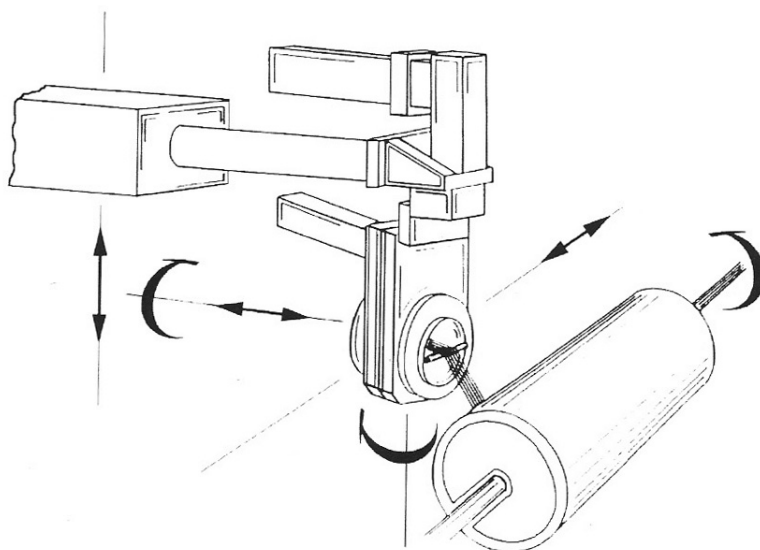


Slika 4.11. Uzorci namotavanja [3]



Slika 4.12. Vijčano namotavanje [3]

Namotavanje se vrši na posebnim strojevima koji mogu imati i do 7 stupnjeva slobode gibanja. Na njima se mogu podesiti željeni uzorci namotavanja, brzina i kutovi namotavanja, temperatura smole i napregnutost vlakana. Danas su dostupni numerički upravljani strojevi za namotavanje za koje se NC kodovi programiraju u posebnim CAD programima. Strojevi za polarno namotavanje su nešto jednostavnije konstrukcije, ali je sam proces otežan zbog ograničenja vlakana. Češće se primjenjuju strojevi za vijčano namotavanje. Složene su konstrukcije i imaju 6 numerički upravljanih osi. Na slici 4.13 prikazan je stroj za vijčano namotavanje.



Slika 4.13. Stroj za vijčano namotavanje [2]

Prednosti tog postupka su: visoka ponovljivost svojstava, korištenje kontinuiranih vlakana u smjeru naprezanja (postiže se namještanjem kuta namotavanja), niska cijena opreme i izrade, mogućnost proizvodnje velikih dijelova, jeftini materijal, visoki omjer čvrstoće i gustoće, visoki udio vlakana (do 80 %) koji jamči višu čvrstoću [3].

Nedostaci su ograničenje kod proizvodnje kompleksnih oblika, izrada jezgri je skupa, loša kvaliteta površine, potreba za naknadnom obradom, skupi strojevi, izračunavanje kuta namatanja vlakana [3].

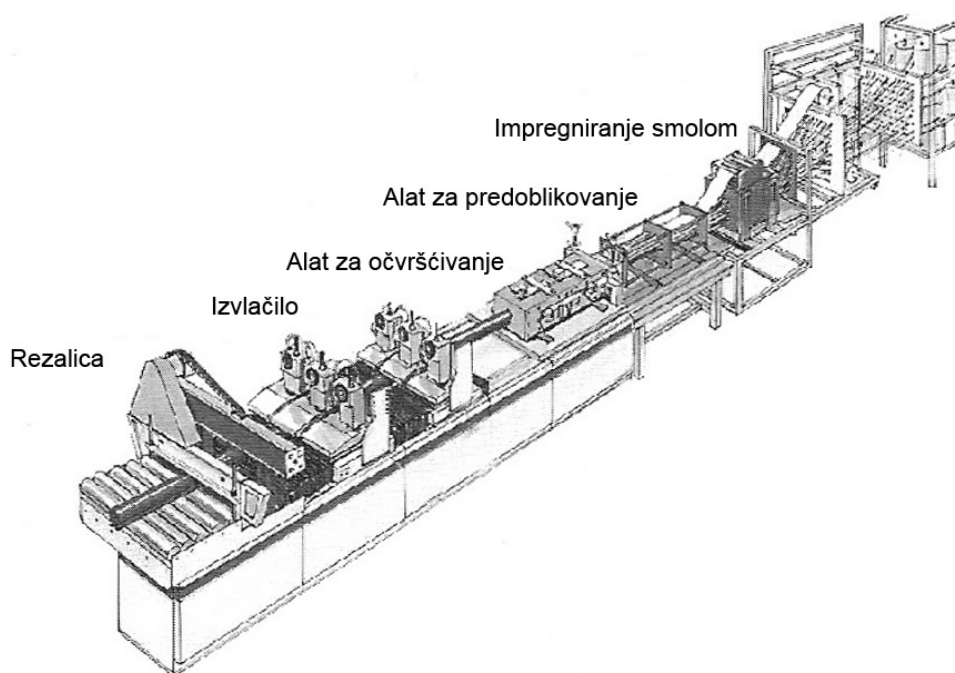
Taj postupak rabi se za proizvodnju osovina za zrakoplove i helikoptere, lopatica vjetrenjača, spremnika kisika ili prirodnog plina, cijevi, tlačnih spremnika, dijelova raketa, konstrukcijskih elemenata i sportske opreme. Zbog niske cijene i dobrih svojstava proizvoda taj postupak se sve više razvija i primjenjuje. Moguće je proizvoditi i oblike koji nisu nužno cilindrični.

4.5. Pultrudiranje

4.5.1. Pultrudiranje duromernih kompozita [2]

Pultrudiranje (e. *Pultrusion*) je jedini kontinuirani proces proizvodnje kompozita pogodan za masovnu proizvodnju i postizanje visoke kvalitete. Taj postupak objedinjava procese impregniranja ojačavala i umreživanja.

Sam postupak odvija se u nekoliko slijednih jedinica koje čine: sustav dobave vlakana, spremnik za impregniranje smolom, alata za predoblikovanje, alata za očvršćivanje, izvlačila i rezalice. Kapljevita smola postepeno se prolazeći kroz jedinice pretvara u čvrsti gotovi kompozitni proizvod. Nakon napuštanja alata za očvršćivanje kompozit mora biti u čvrstom stanju kako bi izvlačilo moglo djelovati. Na slici 4.14 prikazan je postupak pultrudiranja duromernih kompozita.



Slika 4.14. Pultrudiranje duromernih kompozita [2]

Na početku vlakna sa strukova (e. *Roving*), trake, tkanine ili matovi prolaze kroz sustav za impregniranje vlakana smolom. Kako bi se izbjeglo zaplitanje vlakana prije ulaska u spremnik sa smolom koriste se češljevi. Spremnik za impregniranje smolom sadrži smjesu kapljevite smole i dodataka poput umreživala, pigmenata i usporavala. Da bi se

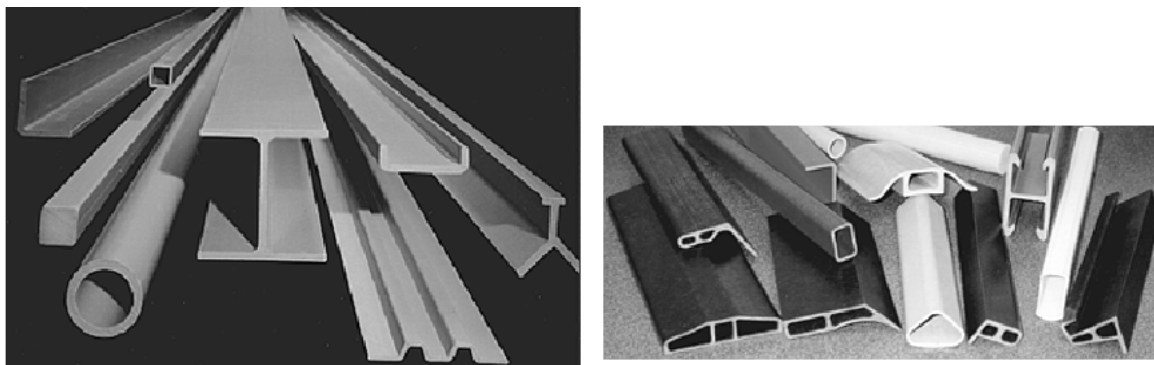
osiguralo dobro vlaženje, vlakna prolaze kroz valjke. Vlakna zatim prolaze kroz alat za predoblikovanje kojim se istiskuje višak smole i oblikuju vlakna. Taj alat se sastoji od niza vodicica napravljenih od PTFE ili čelika. Zatim vlakna prolaze kroz grijani alat za očvršćivanje. Alat se sastoji od mlaznice sa šupljinom željenog presjeka profila i električnih grijala. Zadatak tog alata je održavanje orijentacije vlakana, postizanje odgovarajućeg oblika i umreživanje. Uzduž alata za očvršćivanje postoji više različitih toplinskih zona koje ovise o smoli koja se prerađuje, brzini pultrudiranja i duljini alata. Nakon izlaska iz alata za otvrdnjavanje sada umreženi kompozit prolazi kroz izvlačilo. Brzina izvlačila određuje brzinu pultrudiranja. Na kraju linije nalazi se rezalica koja reže profile na odgovarajuće dimenzije. Na početku umreživanja osim dovedene topline alatu postoji i toplina nastala egzotermnom reakcijom umreživanja smole pa se treba pripaziti na temperature kako bi se izbjegla toplinska razgradnja matrice.

Tim postupkom najčešće se prerađuju kompoziti s matricama od poliesterskih, vinilesterskih ili epoksidnih smola ojačani staklenim, ugljikovim ili aramidnim vlaknima. Uobičajeni udio vlakana kreće se između 40 % i 70 % [1].

Prednosti kompozita dobivenih tim postupkom su: visoka čvrstoća i dobra mehanička svojstva u smjeru vlakana, kemijska postojanost, pogodnost obrade odvajanjem čestica, dimenzijska stabilnost, neograničena duljina profila i dobra kvaliteta površine [3].

Nedostaci su izrada isključivo profila, ograničena veličina u poprečnom smjeru, dobra mehanička svojstva samo u uzdužnom smjeru, velika ulaganja u opremu.

Postupak je pogodan za proizvodnju proizvoda namijenjenih zrakoplovnoj industriji, građevinarstvu, automobilskoj industriji, proizvodnji sportske opreme i proizvoda široke potrošnje. Primjeri proizvoda su stupovi antena, kućišta elektroničkih uređaja, okviri vrata i prozora, konstrukcijski elementi za građevinarstvo (mreže, ploče, štapovi). Razvojem tog postupka, proizvodnja više nije ograničena na proizvodnju jednostavnih profila konstantnih presjeka. Slika 4.15 prikazuje profile dobivene pultrudiranjem.

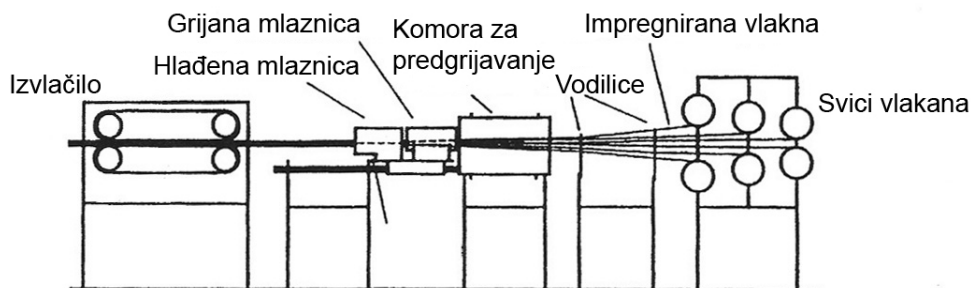


Slika 4.15. Profili dobiveni pultrudiranjem [6]

4.5.2. Pultrudiranje plastomernih kompozita [2]

Prerada plastomera pultrudiranjem otežana je zbog visoke viskoznosti plastomera. Viskoznost taljevine plastomera veća je 2 do 3 puta nego kod duromernih smola i nije ju moguće bitno sniziti povišenjem temperature. Jedna od glavnih prednosti pultrudiranih plastomera je mogućnost ponovnog rastaljivanja što omogućuje naknadno oblikovanje ili spajanje djelova.

Sam postupak pultrudiranja plastomernih kompozita razlikuje se u izvedbi alata za očvršćivanje. Alat se sastoji od dvije mlaznice od kojih je prva grijana, a druga hladena. Grijana matrica u kojoj se plastomer tali kraće je duljine od mlaznice kod pultrudiranja duromera. Također, mlaznica ima dulji konusni ulaz koji osigurava natražno gibanje taljevine čime se postiže bolja impregnacija vlakana. Na slici 4.16 prikazano je pultrudiranje plastomernih kompozita.



Slika 4.16. Pultrudiranje plastomernih kompozita [2]

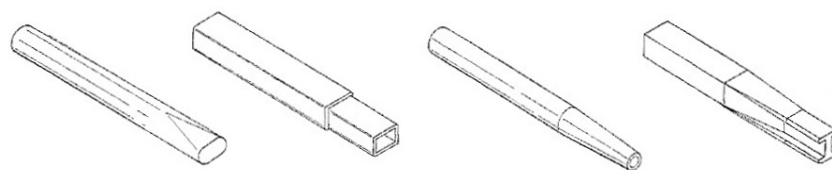
Razvojem mlaznica za impregniranje vlakana plastomerima povećao se interes za tim postupkom. Taj postupak ima veću proizvodnost u usporedbi s pultrudiranjem duromernih kompozita. Kod pultrudiranja duromera brzina proizvodnje ovisi o vremenu umreživanja smole. Budući da je kod pultrudiranja plastomernih kompozita brzina ograničena jedino brzinom kojom vlakna mogu biti zagrijana na temperaturu tališta plastomera i brzinom hlađenja, mogu se postići brzine kao kod ekstrudiranja plastomera. Ti kompoziti imaju bolje karakteristike od duromernih poput: više žilavosti, postojanosti na kemikalije i vanjske uvjete i mogućnosti recikliranja. Kod većih brzina pultrudiranja dolazi do pada mehaničkih svojstava zbog toga što je kraće vrijeme zadržavanja u mlaznici što vodi do nižeg stupnja kristalizacije. Može doći i do slabije impregnacije i vezanja vlakana i matrice.

Neki od plastomera koji se koriste kod pultrudiranja su: PP, PMMA, PET, PC, PEI, PPS.

4.5.3. Ostali postupci pultrudiranja [2]

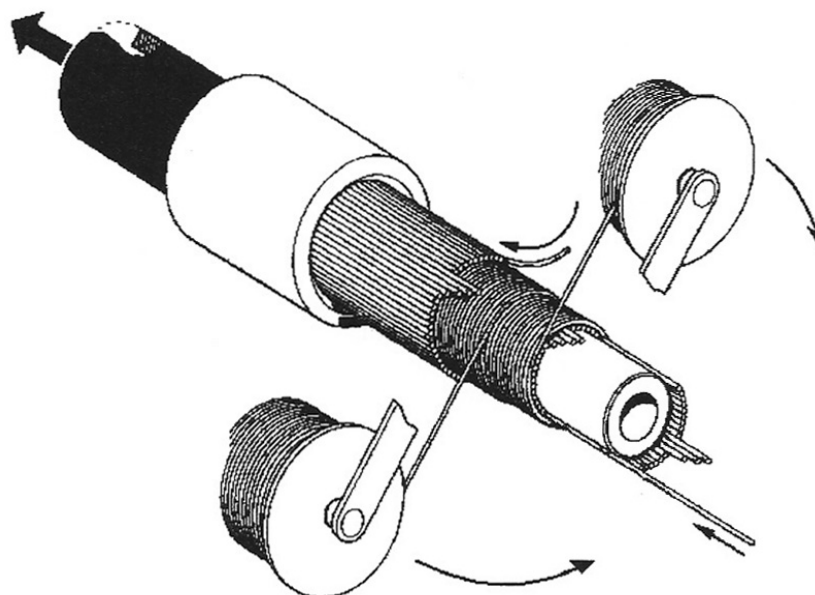
Povlačno oblikovanje (e. *Pullshaping*) je kontinuirani postupak proizvodnje profila nelinearnih oblika. Postoje dva načina proizvodnje. Kod prvog načina vlakna natopljena smolom prolaze kroz alat za predoblikovanje i zatim prolaze kroz dvije mlaznice. Te dvije mlaznice nalaze se na okvirima koji se mogu rotirati. Rotacijom mlaznica dobiva se zakrivljeni oblik. Kod drugog načina obje mlaznice su fiksne, a druga mlaznica ima šupljinu u obliku željene krivulje po cijeloj svojoj duljini.

Posebna inačica povlačnog oblikovanja nosi engleski naziv *Pullforming*. To je postupak kojim se mogu proizvesti profili promjenjivog poprečnog presjeka. U ovom postupku koristi se posebna mlaznica koja ima mogućnost temperiranja. Njome se mogu proizvesti profili sa neumreženim dijelovima koji se mogu naknadno oblikovati i umrežiti. Na slici 4.17 prikazani su proizvodi dobiveni tim postupkom.



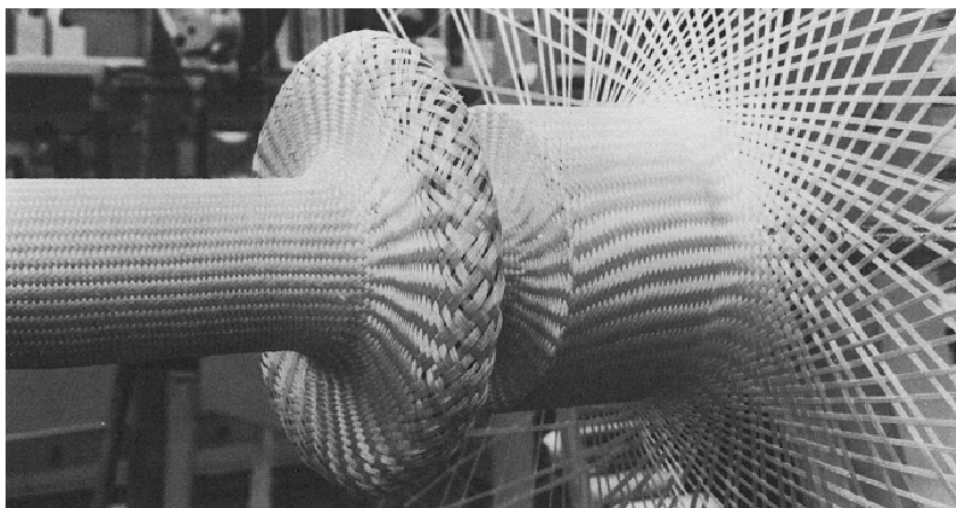
Slika 4.17. Proizvodi dobiveni postupkom *Pullforming* [2]

Povlačno namotavanje (e. *Pullwinding*) je postupak koji kombinira postupke pultrudiranja i namotavanja filamenata. Tim postupkom postižu se dobra mehanička svojstva kompozita budući da postoje uzdužno orijentirana kontinuirana vlakna i vijčano namotana vlakna. Postupak je pogodan za proizvodnju cijevi namijenjenih visokim tlakovima. Oprema se sastoji od dva nezavisna stroja: stroja za namotavanje i pultrudiranje. Stroj za namotavanje posjeduje dvije ruke za namotavanje koje rotiraju u suprotnim smjerovima oko jezgre. Namještanjem kuta vlakana postižu se razni uzorci namotavanja. Jezgra s impregniranim namotanim vlaknima prolazi kroz šuplju osovinu, a u isto vrijeme ruke namotavaju još jedan sloj suhih vlakana preko impregniranih. Zatim jezgra prolazi kroz alat za očvršćivanje. Taj postupak prikazan je na slici 4.18.



Slika 4.18. Povlačno namotavanje [2]

Postoji još jedna inačica prethodnog postupka kod koje se umjesto namotavanja vlakna ona pletu na jezgru uz pomoć tkalačkih strojeva. Slika 4.19 prikazuje primjer tkanja staklenih vlakana na osovinu [3].



Slika 4.19 Tkanje staklenih vlakana na osovinu [6]

4.6. Ostali postupci preradbe

4.6.1. Centrifugalno lijevanje [2]

Kod centrifugalnog lijevanja matovi ili preprezi su postavljeni u šuplji cilindrični metalni kalup koji se nalazi unutar peći. Smjesa smole i umreživala raspršuje se po matu dok kalup rotira oko svojih osi. Centrifugalna sila raspodjeljuje smolu i impregnira vlakna smolom. Kalup se grije na oko 90 °C kako bi se ostvarilo odgovarajuće umreživanje. Nakon umreživanja kalup prestaje rotirati i proizvod se izvlači iz kalupa. Tim postupkom dobiva se dobra kvaliteta površine ali i nešto slabija mehanička svojstva, pa se koriste uglavnom kod izrade spremnika većih promjera.

4.6.2. Lijevanje [3]

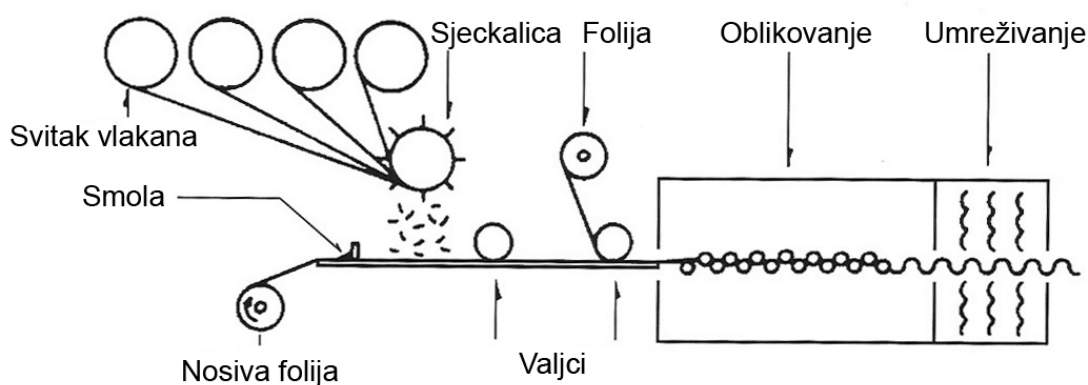
Kod tog postupka duromerna smola se ulijeva u otvoreni ili zatvoreni kalup koji sadržava vlakna u obliku matova. Prednost tog postupka je niža cijena kalupa i proizvoda. Nedostaci su: ograničenost veličine dijelova, potreba za naknadnom obradom i niska proizvodnost.

4.6.3. Ekstrudiranje [3]

Ekstrudiranje se koristi uglavnom kod proizvodnje profila od plastomernih kompozita. Postupak je identičan ekstrudiranju plastomera, ali se mora pripaziti na duljinu vlakana koja mora biti nešto kraća. Vlakna ne smiju sadržavati vlagu i mora se osigurati dobro vlaženje vlakana i plastomera. Postoji i kombinacija ekstrudiranja i izravnog prešanja gdje se ekstrudati ulažu u kalup preše nakon izlaska iz alata.

4.6.4. Kontinuirano laminiranje [2]

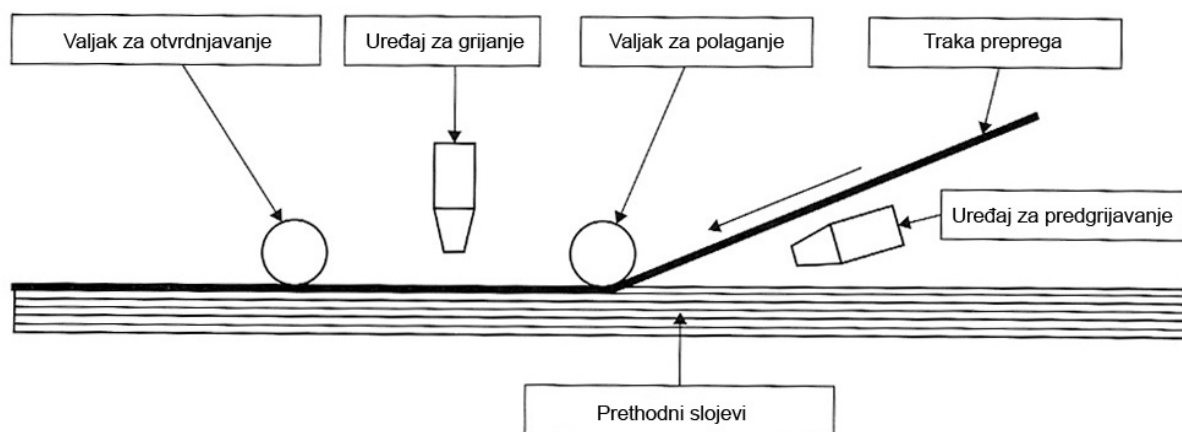
Kod ovog postupka sjeckalica siječe vlakna sa strukova koja padaju na nosivu foliju izrađenu od celofana. Na nosivu foliju je prethodno nanešen sloj smole. Folija sa smolom i vlaknima zatim prolazi kroz valjke koji uklanjaju zaostale mjehuriće zraka. Zatim se na vrh stavlja drugi sloj folije i one ponovno prolaze kroz valjke koji osiguravaju dobru impregnaciju i određuju debljinu ploče. Nakon toga slijedi peć u kojoj kompozit umrežuje pri temperaturi između 90 °C i 150 °C. U peći se mogu nalaziti valjci kojima se mogu postići valoviti oblici. Nakon izlaska iz peći nosive folije se skidaju i ploče se režu na odgovarajuće dimenzije. Na slici 4.20 prikazan je postupak kontinuiranog laminiranja.



Slika 4.20. Postupak kontinuiranog laminiranja [2]

4.6.5. Drapiranje preprega [3]

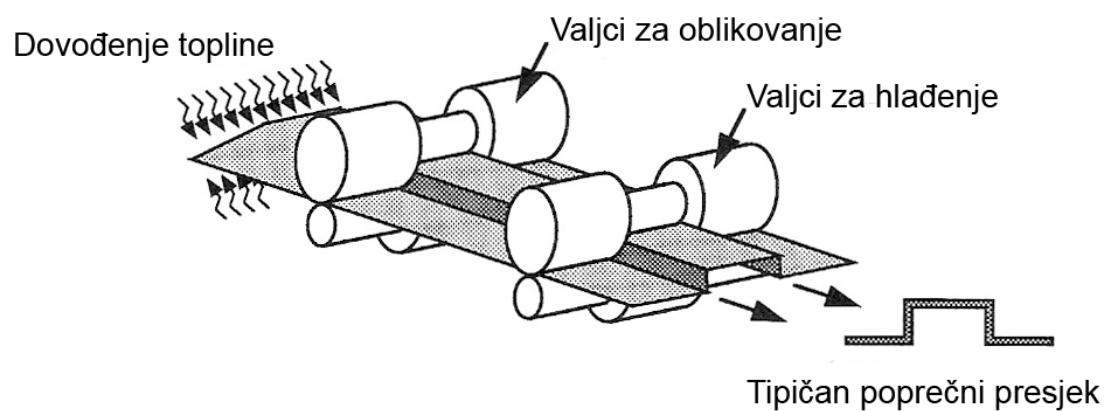
Kod tog postupka preprezi u obliku traka, tkanina polažu se na površinu kalupa. Pri tome mogu se koristiti automatizirani strojevi ili se polagati može ručno. Kod automatiziranog postupka pri polaganju se koriste grijala i valjci koji osiguravaju dobru impregnaciju vlakana smolom i dobro vezanje na prethodne slojeve. Umreživanje se vrši u pećima ili autoklavima. Ovim postupkom mogu se postići složeni oblici, pa se koriste kod izrade prototipova i u zrakoplovnoj industriji. Nešto niža ulaganja u opremu kompenzirana su velikim udjelom ljudskog rada i potrebom za iskusnim radnicima. Automatizirani postupak prikazan je na slici 4.21.



Slika 4.21. Drapiranje preprega [3]

4.6.6. Oblikovanje valjanjem [10]

Oblikovanje valjanjem (e. *Roll Forming*) kontinuirani je postupak proizvodnje kompozita. Kod tog postupka ploča plastomernog kompozita grije se iznad tališta i zatim se provlači kroz serije hladnih valjaka. Ti valjci postepeno oblikuju željeni profil. Mogu se postići brzine proizvodnje i do 10 m/min. Prednost tog procesa je proizvodnja profila velikih duljina. Postupak je prikazan na slici 4.22.



Slika 4.22. Oblikovanje valjanjem [10]

5. EKSPERIMENTALNI RAD

5.1. Uvod

Pravilna primjena kompozitnih materijala nije moguća bez poznavanja njihovih svojstava. U cilju postizanja odgovarajućih mehaničkih svojstava kompozita nužno je poznavati utjecaj konstituenata na njihova svojstva. U ovom radu provedena su ispitivanja savijanjem, ispitivanjem tvrdoće, određivanjem masenog udjela ojačavala i udjela šupljina u kompozitu, kako bi se ustanovio utjecaj broja slojeva ojačavala na mehanička svojstva kompozita.

5.2. Upotrijebljeni materijali

Ispitivanje mehaničkih svojstava obavljeno je s ciljem usporedbe mehaničkih svojstava kompozita s različitim brojem slojeva ojačavala. Kao ojačanje korištene su staklene tkanine proizvođača *R&G*. Korištene su staklene tkanine plošne mase 80 g/m^2 , 163 g/m^2 i 390 g/m^2 . Tkanine su tkane običnim i keper vezom, a orijentacija vlakana tih dvoosnih tkanina je $0^\circ / 90^\circ$. Vlakna tih tkanina izrađena su od E stakla. U tablici 5.1 prikazana su svojstva uporabljenih tkanina.

Za polimernu matricu odabrana je epoksidna smola *EPIKOTE L1100* proizvođača *R&G*, a kao umreživalo korišteno je *EPIKURE EPH 294* istog proizvođača. Epoksidna smola *EPIKOTE L1100* niskoviskozna je smola pogodna za dobivanje kompozita visoke dinamičke čvrstoće. Ima sposobnost dobrog vlaženja staklenih, ugljikovih i aramidnih vlakana. Očvršćuje pri niskim temperaturama uz korištenje umreživala na bazi amina. Ova smola pogodna je za postupke pultrudiranja i injekcijskog prešanja te se koristi kod izrade lopatica vjetrenjača, u brodogradnji i kod proizvodnje sportske opreme. U tablicama 5.2 i 5.3 dani su podaci o epoksidnoj smoli i umreživalu [13].

Tablica 5.1. Svojstva staklenih tkanina [14]

Plošne mase staklenih tkanina	80 g/m ²	163 g/m ²	390 g/m ²
Uzorak tkanja	Običan	Keper vez	Keper vez
Tip tkanine	190 110-X	190 120-X	190 148-X
Tip vlakana	EC 9 - 34 Z	EC 9 - 68 Z	EC 9 - 68 x 5t0
Broj vlakana u uzdužnom smjeru na duljini 10 mm	12	11,5	6
Broj vlakana u poprečnom smjeru na duljini 10 mm	12	11,5	6,7
Debljina tkanine, mm	0,1	0,18	0,45
Debljina jednog sloja tkanine u kompozitu, mm	0,07	0,15	0,35
Rastezna čvrstoća u uzdužnom smjeru, N/mm ²	360	370	370
Modul elastičnosti, N/mm ²	19000	21000	21000

Tablica 5.2. Podaci o epoksidnoj smoli [13]

	Epoksidna smola <i>EPIKOTE L1100</i>
Gustoća pri 20 °C	1,150 g/cm ³
Viskoznost pri 25 °C	1,6 MPas
Ekvivalent epoksida	192

Tablica 5.3. Podaci o umreživalu [13]

	Umreživalo <i>EPIKURE EPH 294</i>
Gustoća pri 20 °C	0,934 g/cm ³
Viskoznost pri 25 °C	10 MPas
Ekvivalent amina	56

Smola i umreživalo miješani su u masenom omjeru 10:3 koji slijedi iz proračuna ekvivalenata epoksida i amina. Potrebno ih je dobro promiješati kako bi se ostvarilo pravilno umreživanje. Umreživanje 100 g smole *EPIKOTE L1100* s umreživalom

EPIKURE EPH 294 traje 400 minuta. Vrijeme umreživanja skratilo se stavljanjem u peć pri temperaturi 90 °C. Proizvođač za ovo umreživalo preporuča umreživanje pri temperaturi 20 °C do 25 °C u trajanju od 15 sati i naknadno umreživanje pri temperaturi 70 °C u trajanju od 10 sati [13].

Tip vlakana staklene tkanine plošne mase 80 g/m² je EC 9 - 34 Z. U ovoj oznaci slovo E znači da su vlakna napravljena od E stakla, slovo C da su vlakna kontinuirana, brojka 9 označuje promjer vlakana u mikrometrima, brojka 34 označuje masu vlakana u gramima po 1000 metara duljine, a slovo Z smjer rotacije snopova vlakana u smjeru kazaljke na satu. Kod staklene tkanine plošne mase 390 g/m² prvi niz oznaka je isti, ali se razlikuje u dodatku x5 koji označava broj isprepletenih snopova u jedan snop vlakana i dodatku t0 koji govori da ne postoji rotacija snopa vlakana. Iz oznaka tipova tkanina vidljivo je da su sve tri uporabljene tkanine izrađene od snopova vlakana istih promjera staklenih vlakana i iznose 9 mikrometara. Promjer vlakna dosta utječe na mehanička svojstva; što je manji, svojstva kompozita su bolja. Uporabljene tkanine posebno su prilagođene zrakoplovnoj industriji, posjeduju posebne dodatke koje im daju dobru impregnaciju epoksidnom smolom i dobra mehanička svojstva, nose oznaku *Finish L550* [14].

5.3. Postupak izrade

Kako bi se ispitala savojna čvrstoća kompozita s različitim brojem slojeva staklenih tkanja, izrađene su tri kompozitne ploče za svaku od tri plošne mase tkanja. Ploče su širine 100 mm i duljine 200 mm, izrađene su dodirnim postupkom laminiranja opisanim u poglavlju 4.2.1.1. Ploče su izrađene u poduzeću „*Board Guardian*”.

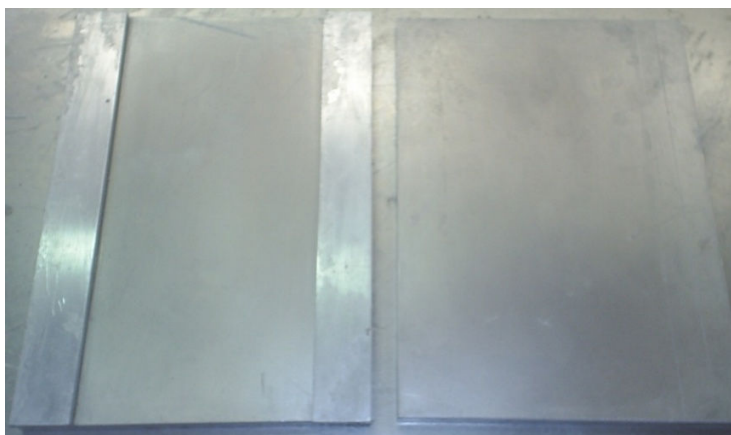
Za svaku od tri plošne mase izrezane su krpice 100 x 200 mm iz namotaja tkanine. Broj slojeva tkanine u kompozitu odnosno broj izrezanih krpica tkanine ovisi o debljini jednog sloja tkanine u kompozitu. Iz kataloga *R&G* za odgovarajuće plošne mase pronađene su debljine jednog sloja. Budući da su ploče prvotno namijenjene ispitivanju savojne čvrstoće kompozita, kao debljina ploče uzeta je visina ispitnih uzoraka koja se u normi navodi za uporabljeni oblik vlakana i iznosi 4 mm. U tablici 5.4 dana je debljina jednog

sloja tkanine u kompozitu za svaku od plošnih masa tkanine i broj slojeva tkanine u kompozitu.

Tablica 5.4. Broj slojeva staklene tkanine [14]

Plošna masa tkanine, g/m ²	Debljina jednog sloja u kompozitu, mm	Broj slojeva
80	0,07	57
163	0,15	26
390	0,35	12

Najprije se pripremio kalup izrađen od aluminija. Kalup je izrađen od dvije aluminijske ploče i dvije letve koje su činile kalupnu šuplinu širine 100 mm, duljine 200 mm i visine 4 mm, pri čemu su krajevi kalupa u uzdužnom smjeru bili otvoreni. Kalup je najprije pripremljen čišćenjem i nanošenjem odvajala *Trennmittel OZ 13*, proizvođača *Huntsman*. Slika 5.1 prikazuje rastavljeni kalup premazan odvajalom.



Slika 5.1. Kalup

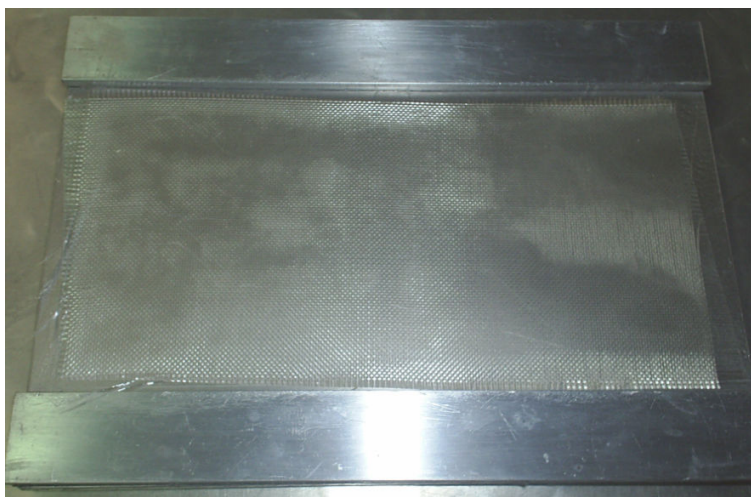
Kalup, staklena vlakna i smola u lončiću stavljeni su zatim na radni stol koji je prethodno zagrijan na 30 °C. Na radnu površinu prethodno je zalijepljena polietilenska folija kako ne bi došlo do doticaja smole i radnog stola. Povišenjem temperature komponenata ostvaruje se bolje vlaženje i olakšava postupak izrade budući da je smola niže viskoznosti.

Količina smole određena je prema specifikacijama proizvođača i dana je u tablici 5.5 za svaku od plošne mase tkanja. Količina pripremljene smole iznosi 80 % težine vlakana. Za svako od staklenih tkanja pripremljena je odgovarajuća količina smole u polietilenskom lončiću, miješajući komponente drvenom žlicom.

Tablica 5.5. Masa smole

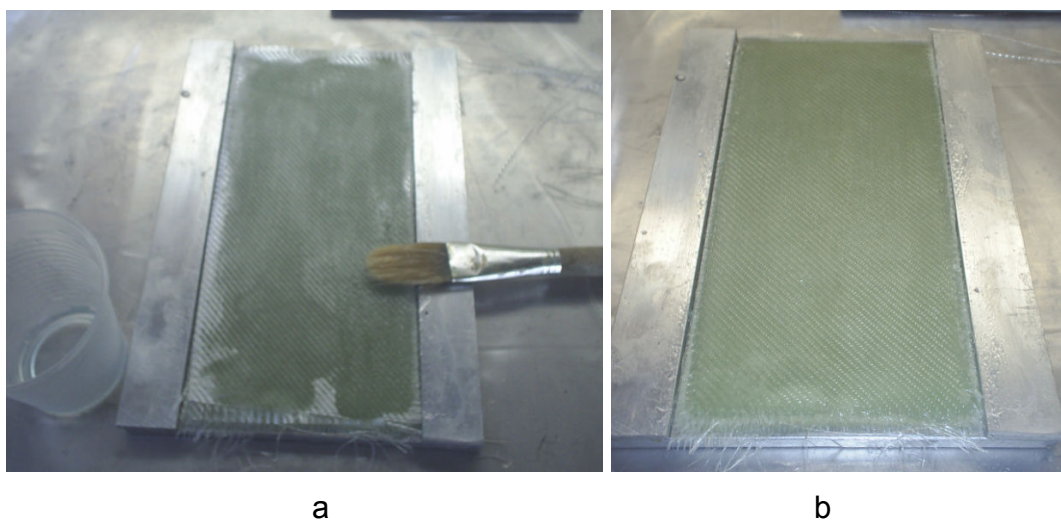
Plošna masa tkanja, g/m ²	Masa vlakana, g	Masa smole, g	Masa umreživala, g	Masa pripremljene smole, g
80	89	49	21	70
163	80	46	19	65
390	80	46	19	65

Nakon pripreme smole i tkanja pristupilo se izradi kompozita. Najprije se na alat premazan odvajalom nanio prvi sloj smole koji se razvaljao valjkom. Zatim se na razvaljanu smolu položila prva krpica staklenog tkanja i razvaljala valjkom kako bi tkanina upila smolu. Za nanašanje smole koristili su se valjak i kist. Time je završeno laminiranje prvog sloja. Prvi sloj tkanine položen na kalup prikazan je na slici 5.2.



Slika 5.2. Prvi sloj tkanine položen u kalup

Nakon polaganja prvog sloja tkanja ponovno se nanijela smola koja se razvaljala valjkom. Na razvaljanu smolu položen je drugi sloj tkanja koji se valjkom razvaljao kako bi upio smolu. Postupak nanašanja smole i polaganja krpica u kalup ponavljao se sve dok nije iskorištena sva staklena tkanina određene plošne mase čime se postigla željena debljina kompozita s odgovarajućim brojem slojeva tkanine. Slika 5.3.a prikazuje kalup na polovici postupka laminiranja i slika 5.3.b na kraju postupka.



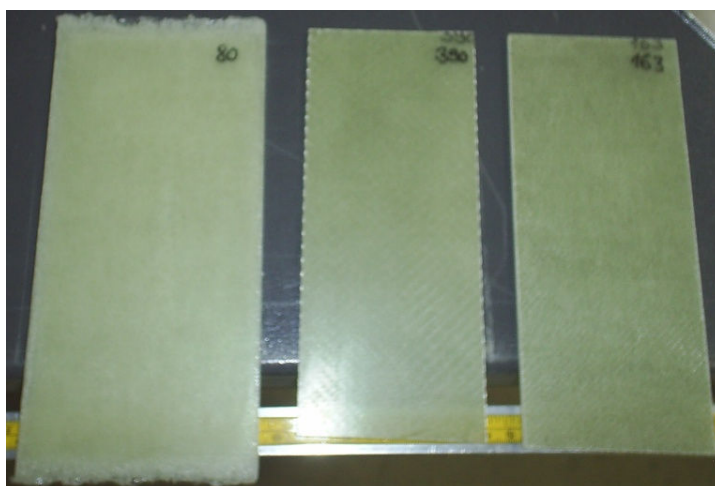
Slika 5.3. Kalup na polovici i na kraju postupka laminiranja

Zatim je na kalup položena druga aluminijska ploča koja je zatvorila kalupnu šupljinu i pritisknula kompozit. Gornja ploča i donja ploča su se uz pomoć stega stegle tako da je kompozit poprimio debljinu aluminijskih letvi, odnosno 4 mm. Pritiskom ostvarenim stegama iz kalupa je istekao višak smole kroz otvore u uzdužnom smjeru. Time je uklonjen višak smole i bolja impregnacija smole i vlakana. Kalup stegnut stegama zatim je stavljen u peć pri temperaturi 90 °C. Nakon dva sata kalup je izvađen iz peći i ostavljen da se hladi pri sobnoj temperaturi. Nakon što se ohladio kalup, iz njega je izvađena kompozitna ploča i stavljena je natrag u peć da dodatno očvrstne. Stegnuti kalup i peć prikazani su na slici 5.4.



Slika 5.4. Stegnuti kalup i peć

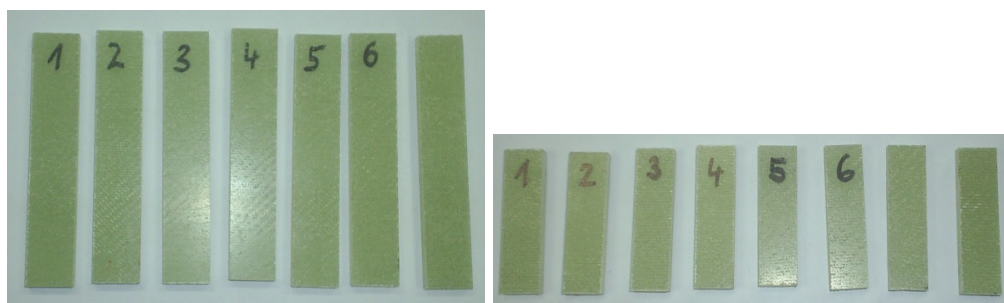
Postupak izrade ponovljen je za svako od tri plošne mase tkanja. Za plošnu masu 163 g/m^2 postupak izrade morao se ponoviti zbog prevelikih odstupanja u vrijednosti savojne čvrstoće koja su se pokazala prilikom mjerenja. Nakon skrućivanja, ploče su najprije izrezane na dimenziju $90 \times 200 \text{ mm}$. Slika 5.5 prikazuje gotove kompozitne ploče.



Slika 5.5 Gotove kompozitne ploče

Iz kompozitnih ploča debljine 4 mm nakon otvrdnjavanja izrezane su dvije serije ispitnih tijela različitih dimenzija. Prva serija dimenzija je 80×15 i namijenjena je ispitivanju savojne čvrstoće. Druga serija ima dimezije 40×10 i namijenjena je ispitivanju prividne

međuslojne smične čvrstoće. Uz pomoć posebnog stroja za rezanje s dijamantnom reznom pločom iz svake ploče izrezano je 7 ispitnih tijela prve serije i 8 druge serije. Ispitna tijela su dodatno obrađena brušenjem. Na slici 5.6 prikazana je prva i druga serija ispitnih tijela.



Slika 5.6. Prva i druga serija ispitnih tijela

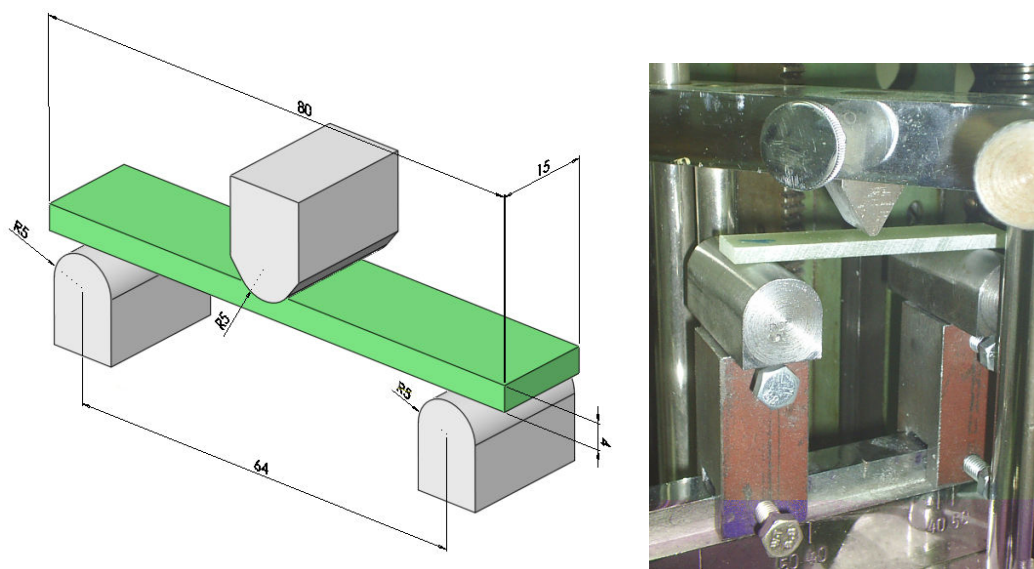
5.4. Ispitivanje mehaničkih svojstava

Nakon izrade ispitnih tijela provedena su ispitivanja sljedećih svojstava: savojne čvrstoće, savojnog modula elastičnosti, prividne međuslojne smične čvrstoće, tvrdoće, određivanje masenih udjela ojačavala i analiza udjela šupljina u kompozitu. Ispitivanja su provedena u Laboratoriju za nemetale Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

5.4.1. Ispitivanje savojne čvrstoće i modula savitljivosti

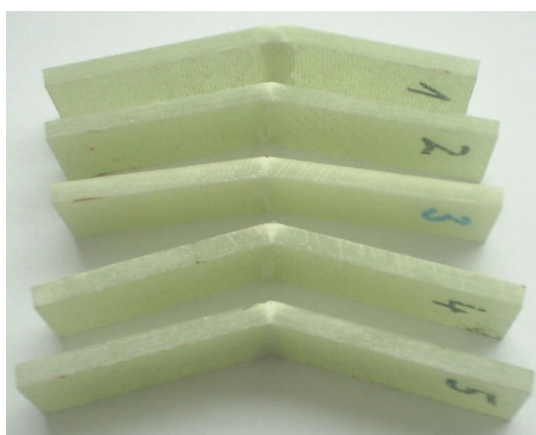
Ispitivanje savojne čvrstoće i modula savitljivosti provedeno je na univerzalnom stroju za ispitivanje mehaničkih svojstava „VEB Industriewerk Raunstein” prema standardu HRN EN ISO 14125 Plastični kompoziti ojačani vlaknima - Određivanje savojnih svojstava.

Odabrana je metoda ispitivanja preko tri točke. Ispitno tijelo propisane duljine 80 mm, širine 15 mm i visine 4 mm oslonjeno je na dva cilindrična oslonca polumjera 5 mm i opterećena silom F preko cilindričnog žiga istog promjera. Razmak između oslonaca propisan je standardom i iznosi 64 mm. Na slici 5.7 prikazano je ispitno tijelo na ispitnom uređaju.



Slika 5.7. Ispitno tijelo na ispitnom uređaju

Za svaku od tri serije ispitnih tijela napravljenih od vlakana različite plošne mase ispitano je po pet ispitaka. Brzina opterećivanja bila je konstantna i iznosila je 5 mm/min. Za svako ispitno tijelo mjerio se odgovarajući progib za sile opterećivanja u rasponu od 10 N do 100 N u koracima od 10 N. Nakon toga nastavilo se opterećivati ispitna tijela sve dok nije došlo do loma te je pri tome očitana maksimalna sila. Na slici 5.8 prikazan je izgled ispitnih tijela nakon ispitivanja.



Slika 5.8. Izgled ispitnih tijela nakon ispitivanja

Najprije su konstruirani dijagrami ovisnosti sile opterećivanja o progibu. Dobiveni su pravci iz kojih su se očitavali koeficijenti smjera pravca potrebni kod izračunavanja modula savitljivosti. Tablice s podacima o progibu i silama za svako ispitno tijelo i dijagrami dani su u prilogu (8.1 - 8.3).

Savojna čvrstoća računa se prema jednadžbi (5.1): [15]

$$R_{ms} = \frac{3FL}{2bh^2} \quad (5.1)$$

Gdje su:

R_{ms} - savojna čvrstoća, N/mm²

F - sila opterećenja, N

L - razmak između oslonaca, mm

b - širina ispitnog tijela, mm

h - visina ispitnog tijela, mm

Modul savitljivosti računa se prema jednadžbi (5.2): [15]

$$E_s = \frac{FL^3}{4fbh^3} \quad (5.2)$$

Gdje su:

E_s - modul savitljivosti, N/mm²

f - progib ispitnog tijela, mm

F/f - koeficijent smjera pravca, N/mm

Prema ovim jednadžbama izračunate su savojne čvrstoće i moduli savitljivosti za svako ispitno tijelo. Za svaku seriju ispitnih tijela izračunate su aritmetičke sredine i standardno odstupanje svih vrijednosti prema jednadžbama 5.3 i 5.4. Izračunate vrijednosti, maksimalne sile, dimenzije i ostali podaci unešeni su u tablice 5.6, 5.7 i 5.8.

Aritmetička sredina računa se prema jednadžbi (5.3):

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (5.3.)$$

Procijenjeno standardno odstupanje računa se prema jednadžbi (5.4):

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (5.4.)$$

Tablica 5.6. Savojna čvrstoća i modul savitljivosti kompozita s staklenom tkaninom
plošne mase 80 g/m²

Redni broj	h , mm	b , mm	F/f , N/mm	L , mm	F_{\max} , N	R_{ms} , N/mm ²	E_s , N/mm ²
1	4	15,2	282,6	64	1360	536,8	19038
2	4	15,1	235	64	1330	528,5	15936
3	4	15,2	259,9	64	1260	497,4	17509
4	4	15,2	279,9	64	1290	509,2	18856
5	4	15,1	282,7	64	1300	516,6	19171
\bar{x}	4	15,16	268,02	64	1308	517,7	18102
S	0	0,054	20,769	0	38,340	15,6	1381,1

Tablica 5.7. Savojna čvrstoća i modul savitljivosti kompozita s staklenom tkaninom
plošne mase 163 g/m²

Redni broj	h , mm	b , mm	F/f , N/mm	L , mm	F_{\max} , N	R_{ms} , N/mm ²	E_s , N/mm ²
1	4	15,2	282,6	64	1080	429,1	15529
2	4	15,1	235	64	1085	428,3	14693
3	4	15,2	259,9	64	1100	434,2	16768
4	4	15,2	279,9	64	1070	422,4	15184
5	4	15,1	282,7	64	1130	449,0	17435
\bar{x}	4	15,16	268,02	64	1093	432,6	15922
S	0	0,054	20,769	0	23,345	10,087	1141,6

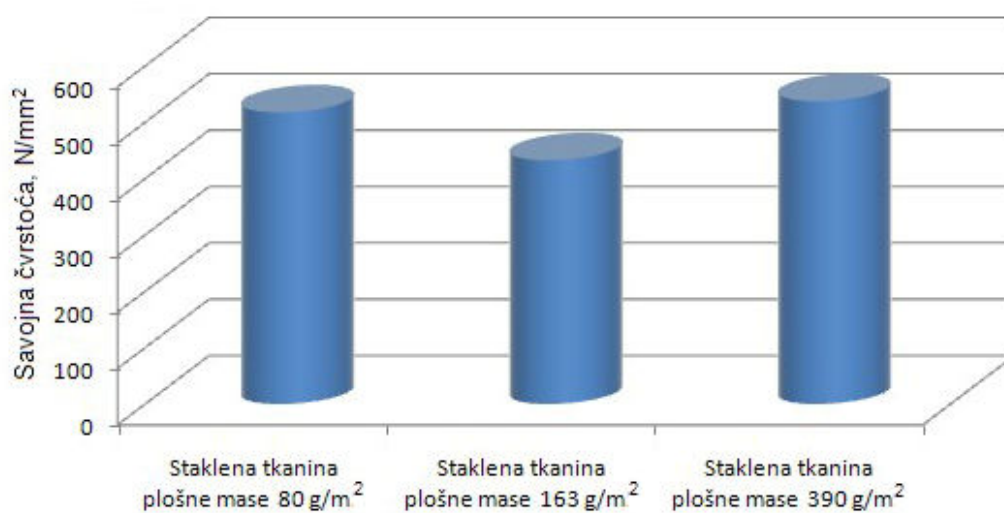
Tablica 5.8. Savojna čvrstoća i modul savitljivosti kompozita s staklenom tkaninom plošne mase 390 g/m^2

Redni broj	h , mm	b , mm	F/f , N/mm	L , mm	F_{\max} , N	R_{ms} , N/mm ²	E_s , N/mm ²
1	4	15,2	282,6	64	1260	497,4	17145
2	4	15,1	235	64	1360	536,8	20197
3	4	15,2	259,9	64	1490	588,2	18809
4	4	15,2	279,9	64	1440	568,4	16512
5	4	15,1	282,7	64	1260	497,4	16478
\bar{x}	4	15,16	268,02	64	1366	537,6	17828
S	0	0,054	20,769	0	104,019	41,060	1627,4

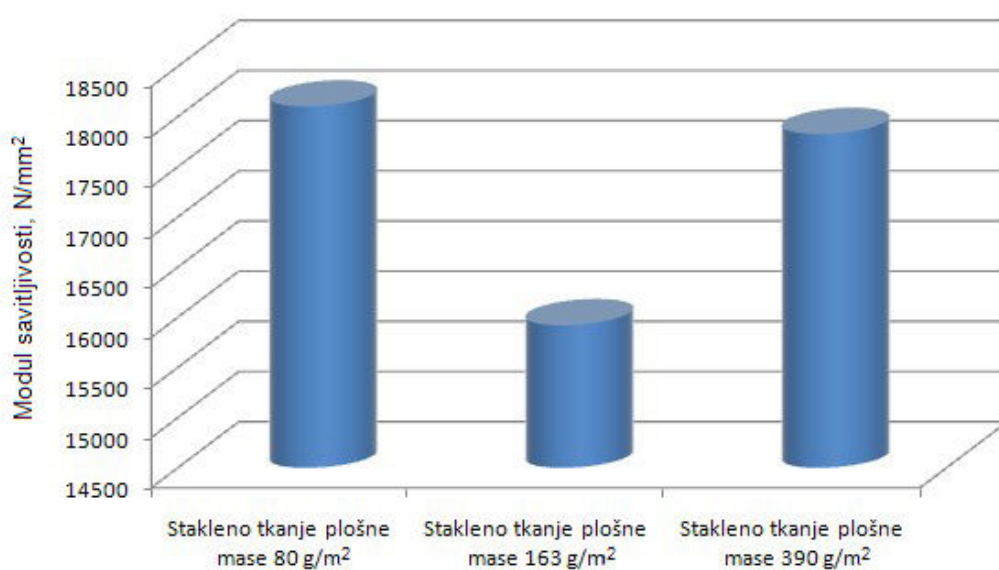
Iz dobivenih rezultata vidljivo je da kompozit s staklenom tkaninom plošne mase 390 g/m^2 ima najvišu savojnu čvrstoću i modul savitljivosti. Slijede ga kompozit s staklenom tkaninom plošne mase 80 g/m^2 i kompozit s staklenom tkaninom plošne mase 163 g/m^2 . Na slikama 5.9 i 5.10 dani su dijagrami ovisnosti savojne čvrstoće i modula savitljivosti o plošnoj masi staklene tkanine.

Ispitivanje je pokazalo da kompozit sa staklenom tkaninom plošne mase 390 g/m^2 ima najbolja mehanička svojstva. Razlog tome je manji broj slojeva ojačavala, odnosno samo 12 slojeva staklene tkanine. Korištenjem manjeg broja slojeva staklene tkanine postigla se homogenija struktura kompozita, odnosno na manje mjesta postoje nedostaci vezani uz vezanje slojeva tkanine i smole odnosno uz proizvodni postupak. Drugi razlog leži u načinu tkanja tkanine. Kod kompozita s staklenom tkaninom plošne mase 163 g/m^2 i 390 g/m^2 ona je tkana keper vezom kojim se postižu bolja mehanička svojstva budući da se vlakna manje savijaju. Kod keper veza postiže se bolja impregnacija vlakana smolom zbog veće poroznosti tkanine, što pridonosi homogenosti strukture. Kompozit s staklenom tkaninom plošne mase 80 g/m^2 ima nešto veću savojnu

čvrstoću i modul savitljivosti od kompozita s staklenom tkaninom 163 g/m² zbog toga što, iako je tkan običnim uzorkom tkanja, ima veliki broj slojeva ojačavala.



Slika 5.9. Dijagram ovisnosti savojne čvrstoće o plošnoj masi staklene tkanine

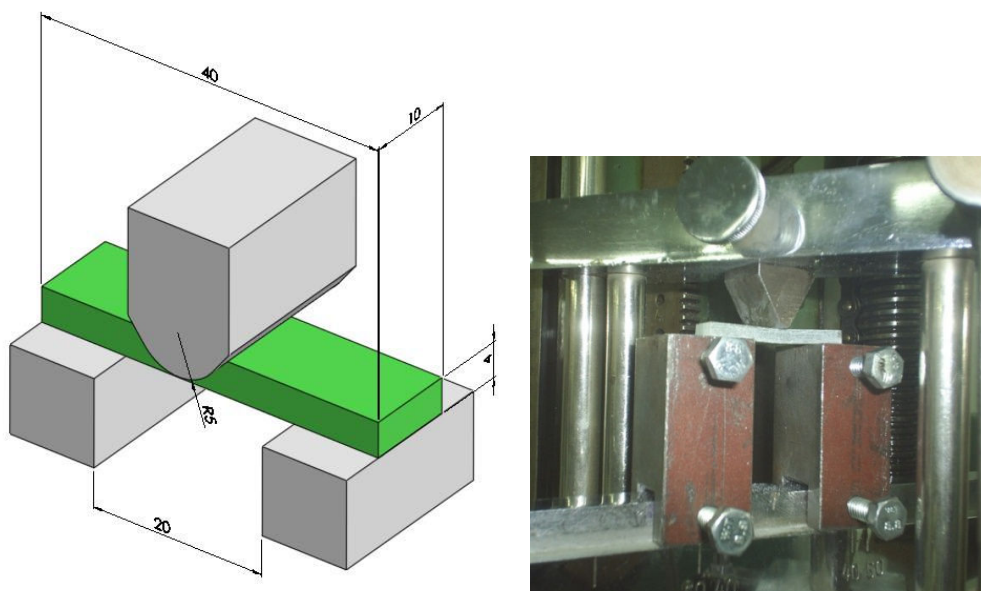


Slika 5.10. Dijagram ovisnosti modula savitljivosti o plošnoj masi staklene tkanine

5.4.2. Određivanje prividne međuslojne smične čvrstoće metodom kratke grede

Određivanje prividne međuslojne smične čvrstoće metodom kratke grede također je provedeno na univerzalnom stroju za ispitivanje mehaničkih svojstava. Ispitivanje je provedeno prema standardu HRN EN ISO 14130 Plastični kompoziti ojačani vlaknima - Određivanje prividne međuslojne smične čvrstoće metodom kratke grede.

Odabrana je metoda ispitivanja preko tri točke. Ispitno tijelo propisane duljine 40 mm, širine 10 mm i visine 4 mm oslonjeno je na dva pravokutna oslonca i opterećena silom F preko cilindričnog žiga istog promjera. Razmak između oslonaca propisan je standardom i iznosi 20 mm. Na slici 5.11 prikazano je ispitno tijelo na ispitnom uređaju.



Slika 5.11. Ispitno tijelo na ispitnom uređaju

Za svaku od tri serije ispitnih tijela napravljenih od vlakana različite plošne mase ispitano je po pet ispitaka. Brzina opterećivanja bila je konstantna i iznosila je 5 mm/min. Za svako ispitno tijelo mjerilo se odgovarajući progib za sile opterećivanja u rasponu od 10 N do 100 N u koracima od 10 N. Nakon toga nastavilo se opterećivati sve dok nije došlo do loma te je pri tome očitana maksimalna sila.

Dobiveni podaci unešeni su u tablice te su prema njima izračunate prividne međuslojne smične čvrstoće svakog ispitnog tijela i njihove aritmetičke sredine za svaku seriju. Podaci su prikazani u tablicama 5.9, 5.10 i 5.11.

Prividna međuslojna smična čvrstoća izračunata je prema jednadžbi (5.5): [16]

$$\tau = \frac{3F}{4bh} \quad (5.5)$$

Gdje su:

τ - prividna međuslojna smična čvrstoća, N/mm²

F - sila opterećenja, N

b - širina ispitnog tijela, mm

h - visina ispitnog tijela, mm

Tablica 5.9. Prividne međuslojne smične čvrstoće kompozita sa staklenom tkaninom plošne mase 80 g/m²

Redni broj	b , mm	H , mm	Površina, mm ²	F , N	L , mm	τ , N/mm ²
1	10	4	40	2200	20	41,25
2	10	4	40	2120	20	39,75
3	10,2	4	40,8	2340	20	43,01
4	10	4	40	2180	20	40,88
5	10,2	4	40,8	2200	20	40,44
\bar{x}	10,08	4	40,32	2208	20	41,06
S	0,1095	0	0,4381	80,7465	0	1,2237

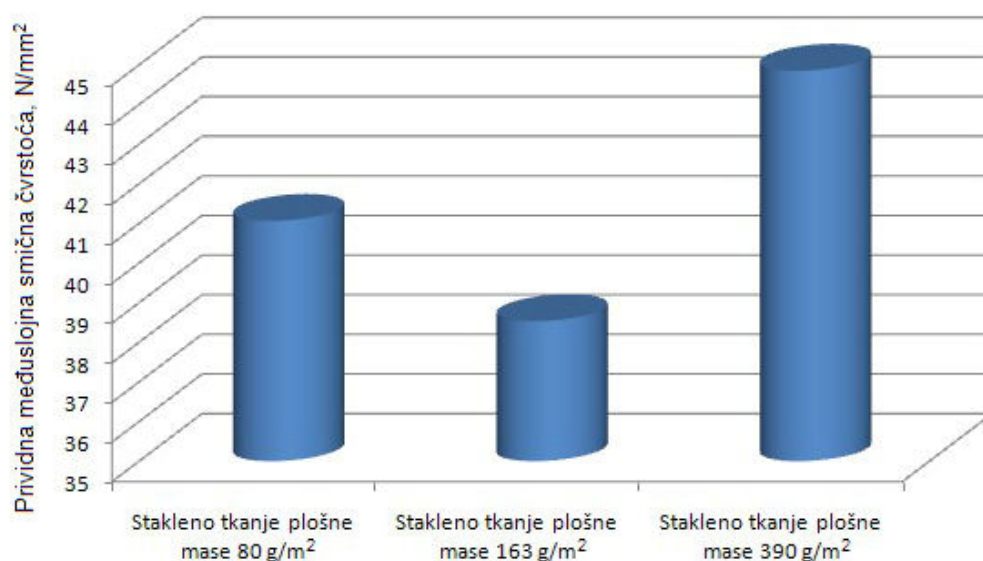
Tablica 5.10. Prividne međuslojne smične čvrstoće kompozita sa staklenom tkaninom plošne mase 163 g/m^2

Redni broj	b , mm	H , mm	Površina, mm^2	F , N	L , mm	τ , N/mm^2
1	10,5	4	42	2110	20	37,68
2	10,5	4	42	2250	20	40,18
3	10,5	4	42	2130	20	38,04
4	10,5	4	42	2080	20	37,14
5	10,4	4	41,6	2200	20	39,66
\bar{x}	10,48	4	41,92	2154	20	38,53
S	0,0447	0	0,1788	69,4982	0	1,3129

Tablica 5.11. Prividne međuslojne smične čvrstoće kompozita sa staklenom tkaninom plošne mase 390 g/m^2

Redni broj	b , mm	H , mm	Površina, mm^2	F , N	L , mm	τ , N/mm^2
1	10	4	40	2460	20	46,125
2	10	4	40	2380	20	44,625
3	10	4	40	2340	20	43,875
4	10	4	40	2420	20	45,375
5	10	4	40	2360	20	44,25
\bar{x}	10	4	40	2392	20	44,85
S	0	0	0	48,1663	0	0,9031

Ispitivanje je pokazalo da kompozit s staklenom tkaninom plošne mase 390 g/m^2 ima najveću prividnu međuslojnu smičnu čvrstoću, a slijede ga kompoziti s staklenim tkaninama plošnih masa 80 g/m^2 i 163 g/m^2 . Na slici 5.12 prikazan je dijagram ovisnosti prividne međuslojne smične čvrstoće o plošnoj masi staklene tkanine.



Slika 5.12. Dijagram ovisnosti prividne međuslojne smične čvrstoće o plošnoj masi staklene tkanine

Razlog zašto kompozit s staklenom tkaninom plošne mase 390 g/m² ima najveću prividnu međuslojnu smičnu čvrstoću je taj što su kod njega isprepleteni snopovi vlakana većeg promjera nego kod druga dva kompozita, pa se njihovim isprepletanjem snopovi vlakana savijaju u valovima većih amplituda. Većim amplitudama valova savijenih vlakana postiže se mehanizam uklinjenja slojeva staklenih vlakana kod tog kompozita čime je i smična čvrstoća veća. Također vrijede i objašnjenja dana kod ispitivanja savojne čvrstoće.

5.4.3. Određivanje tvrdoće metodom utiskivanja kuglice

Tvrdoća je provedena postupkom utiskivanja čelične kuglice promjera 5 mm prema standardu DIN 53456 Ispitivanje tvrdoće postupkom utiskivanja kuglice. Ispitno tijelo postavljeno na ispitni uređaj prikazano je na slici 5.13.



Slika 5.13. Ispitno tijelo postavljeno na ispitnom uređaju

Kuglica je utiskivana silom od 490 N. Tvrdća je ispitana u vremenskim intervalima od 10, 30 i 60 sekundi na sve tri serije ispitnih tijela. Na svakoj seriji provedeno je deset mjerenja u navedenim vremenskim intervalima. Od izmjerenih vrijednosti prodora kuglice oduzeta je vrijednost korekture koja za mjerno područje 490 N iznosi 0,02 mm. Nakon korekcije vrijednosti prodora izračunate su vrijednosti tvrdoće za svako mjerenje prema jednadžbi (5.6).

$$H = \frac{F}{D \pi h_p} \quad (5.6)$$

Gdje su:

H - tvrdoća, N/mm²

F - sila s kojom se vršilo mjerenje, N

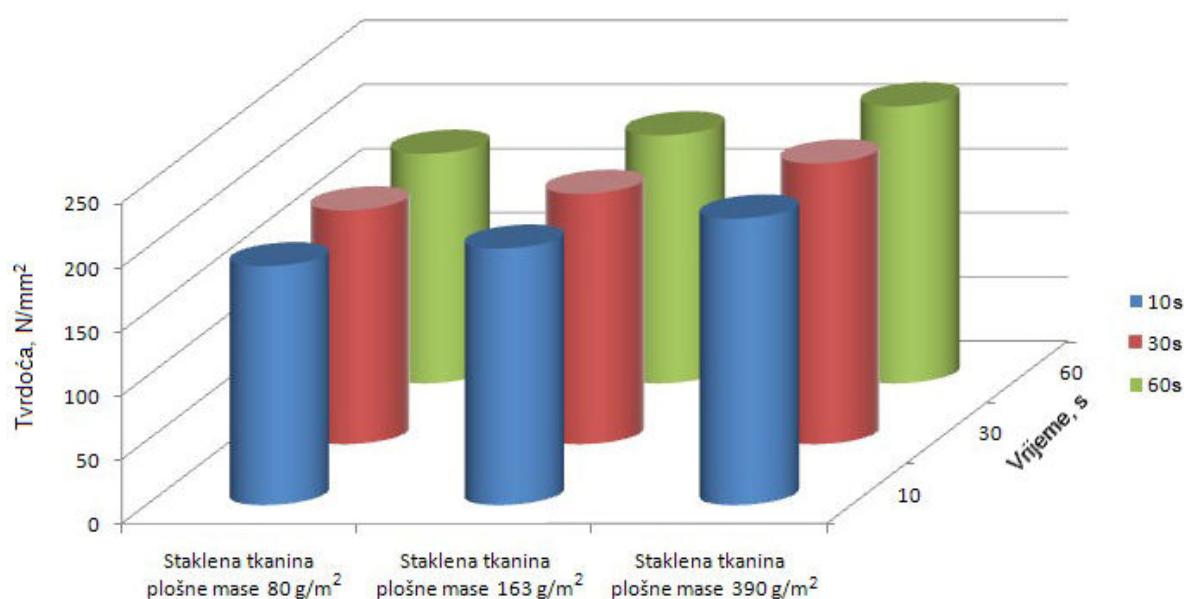
D - promjer kuglice, mm

h_p - dubina prodora kuglice, mm

Izračunate su aritmetičke sredine i standardna odstupanja tvrdoća u vremenskim intervalima za svaku seriju. Rezultati mjerenja i izračunate vrijednosti dani su u tablicama 8.4, 8.5 i 8.6 u prilogu.

Na slici 5.14 prikazan je dijagram ovisnosti tvrdoće o plošnoj masi staklene tkanine i vremenu. Iz dijagrama je vidljivo da kompozit s staklenom tkaninom plošne mase 390 g/m^2 ima veću tvrdoću od druga dva kompozita.

Matrica ima važnu ulogu kod raspodjeljivanja opterećenja na vlakna i osiguravanja tvrdoće kompozita. Kod kompozita s staklenom tkaninom tkanom keper vezom, staklene tkanine plošne mase 390 g/m^2 i 163 g/m^2 , vlakna su bolje propijena smolom. Budući da je vezanje vlakana i matrice bolje, postiže se kompaktnija struktura. Bolja propijenost vlakana smolom osigurava veću tvrdoću jer kompaktnija struktura osigurava bolje prenošenje opterećenja s matrice na vlakna. Najmanju tvrdoću ima kompozit s staklenom tkaninom plošne mase 80 g/m^2 , koja je tkana običnim vezom.



Slika 5.14. Dijagram ovisnosti tvrdoće o plošnoj masi staklene tkanine i vremenu

5.4.4. Određivanje masenog udjela ojačavala

Poznavanjem masenog udjela ojačavala u kompozitu dobiva se bolja slika o mehaničkim svojstvima materijala budući da su vlakna glavni nositelj opterećenja. Određivanje je provedeno prema standardu DIN 53395, a odredio se maseni udio ojačavala u tri uzorka za svaki od tri kompozita različitih plošnih masa staklene tkanine.

Za svaku od plošnih masa staklene tkanine, ispitala su se po 3 ispitna tijela. Ispitna tijela su stavljena u porculanske lončiće i stavljena u peć pri 600 °C. Najprije su se za svaki uzorak vrlo precizno izvagali masa porculanskog lončića, masa uzorka i njihova zajednička masa. Porculanske posude izvađene su iz peći nakon četiri sata, pošto je sva matrica izgorila. U porculanskim lončićima ostala su samo staklena vlakna. Vaganjem lončića sa staklenim vlaknima i oduzimanjem prethodno izmjerene mase lončića, dobila se tražena masa staklenih vlakana. Maseni udio dobio se dijeljenjem mase staklenih vlakana s masom kompozita. Podaci o masama kompozita i maseni udjeli staklenih vlakana dani su u tablici 5.12. Na slici 5.15 prikazani su porculanski lončići s ostacima kompozita odnosno staklenim vlaknima.

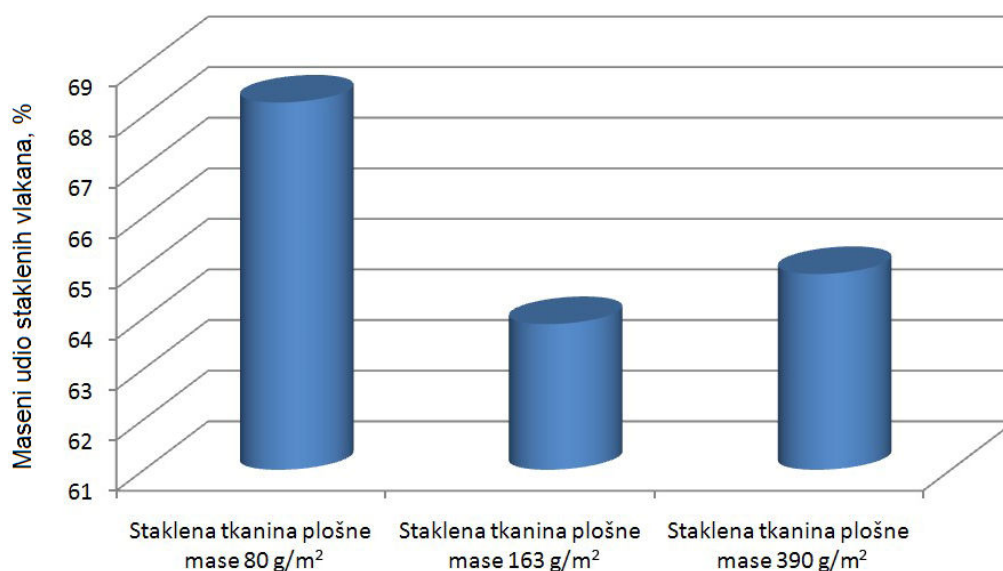


Slika 5.15. Porculanski lončići s staklenim vlaknima

Na slici 5.16 prikazan je dijagram ovisnosti masenog udjela staklenih vlakana o plošnoj masi staklene tkanine. Iz dijagrama je vidljivo da kompozit s staklenom tkaninom plošne mase 80 g/m² ima nešto veći udio staklenih vlakana. Razlog većeg udjela vlakana kod ovog kompozita je taj što se koristeći tkaninu tkanu običnim uzorkom mogu gušće posložiti vlakna. Običan uzorak tkanja pravilne je strukture, a i budući da su snopovi vlakana malih promjera, oni se češće dodiruju između slojeva tkanina. To znači da postoji manje praznina između slojeva tkanine koje ispunjava smola. Manje smole između slojeva tkanine znači i veći udio vlakana.

Tablica 5.12. Maseni udjeli ojačavala

Plošna masa	U. br.	Masa lončića, g	Masa lončića i kompozita, g	Masa kompozita, g	Masa lončića i ostatka, g	Masa ostatka, g	Maseni udio ostatka, %	$\bar{x}, \%$	S
80 g/m ²	1	28,0341	30,5658	2,5317	29,7668	1,7327	68,44		
	2	26,6602	29,0735	2,4133	28,2986	1,6384	67,89	68,26	0,3204
	3	21,8166	24,4026	2,586	23,5867	1,7701	68,45		
163 g/m ²	1	15,5227	18,1523	2,6296	17,2042	1,6815	63,95		
	2	22,6035	25,2375	2,634	24,2943	1,6908	64,19	63,88	0,3502
	3	28,2943	30,4783	2,184	29,6812	1,3869	63,5		
390 g/m ²	1	28,6923	31,5007	2,8084	30,5153	1,823	64,91		
	2	15,8961	18,9461	3,05	17,8713	1,9752	64,76	64,87	0,0964
	3	21,5455	24,5191	2,9736	23,4767	1,9312	64,94		



Slika 5.16. Dijagram ovisnosti masenog udjela staklenih vlakana o plošnoj masi staklene tkanine

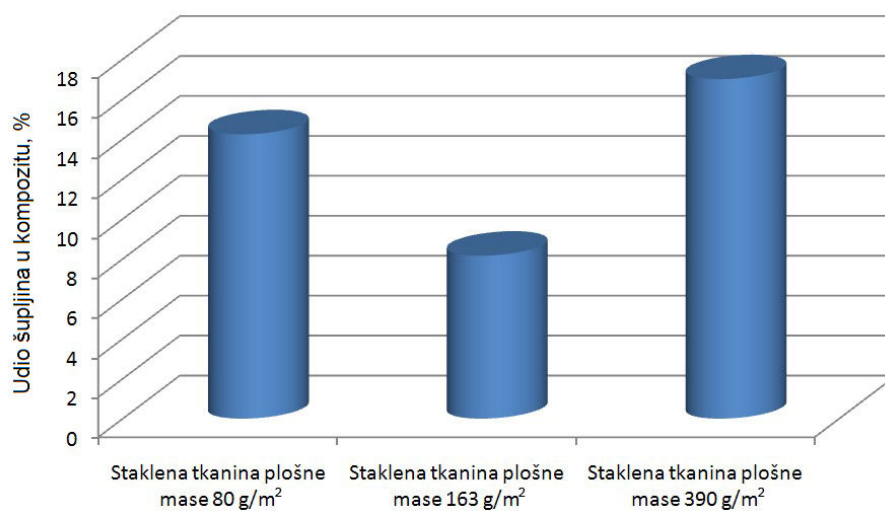
5.4.5. Određivanje udjela šupljina u kompozitu

Posljednje ispitivanje obuhvatilo je analizu udjela šupljina u kompozitu. Postupak se sastojao od pripreme odbrusaka i njihove analize polarizacijskim mikroskopom. Analizirala su se po dva izbruska za kompozite svih triju plošnih masa staklene tkanine.

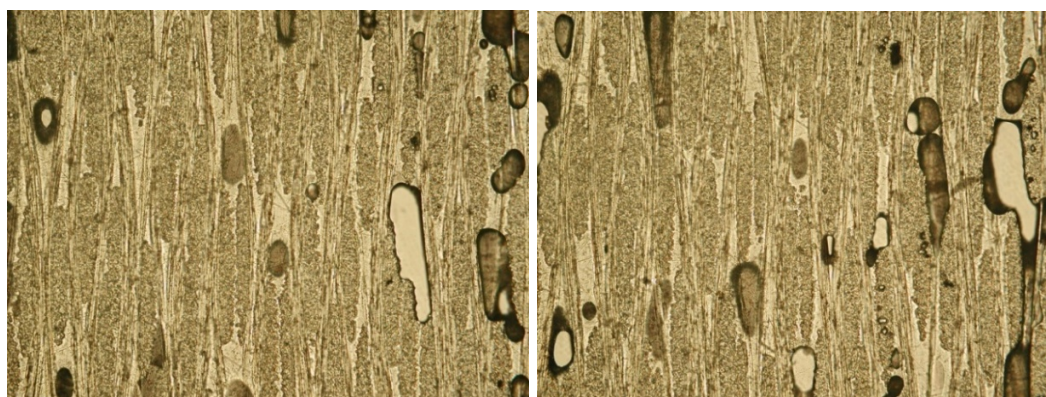
Uz pomoć uređaja *Struers* izrađeni su odbrusci dimenzija 4 x 20 milimetara. Oni su zatim analizirani na polarizacijskom mikroskopu *Olympus BX51*. Uz pomoć mikroskopa napravljeno je po pet snimaka uvećane površine izbrusaka, za svaku plošnu masu staklene tkanine. Udio šupljina na snimkama analiziran je s pomoć programa *ImageJ*, a rezultati su prikazani u tablici 5.13. Izračunate su aritmetičke sredine i standardna odstupanja analiziranih rezultata. Na slici 5.17 prikazan je dijagram ovisnosti udjela šupljina o plošnoj masi staklene tkanine, a na slikama 5.18, 5.19 i 5.20 prikazane su po dvije snimke površine izbrusaka za svaku od plošnih masa staklene tkanine.

Tablica 5.13. Udjeli šupljina u kompozitu

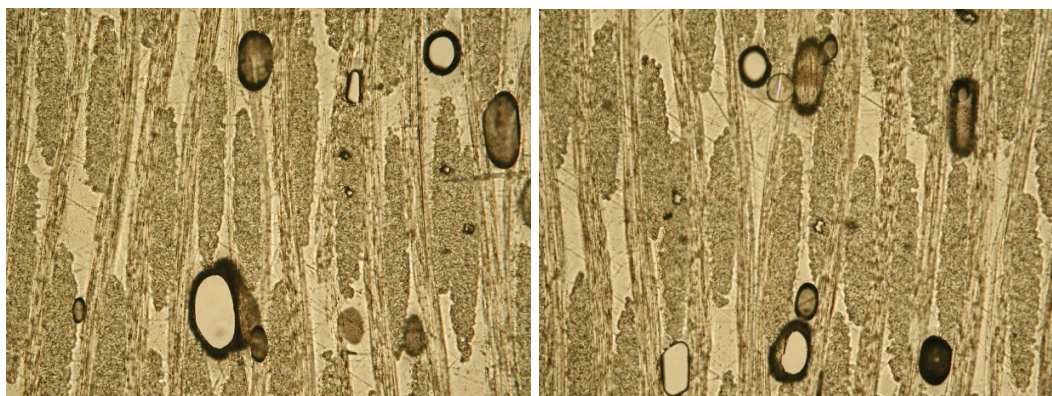
Uzorak broj	Udio šupljina u kompozitu, %					\bar{x} , %	S
	1	2	3	4	5		
Staklena tkanina plošne mase 80 g/m ²	6,6	10,7	13,6	16,5	23,8	14,24	6,4771
Staklena tkanina plošne mase 163 g/m ²	6,4	10,6	5,4	6	12,4	8,16	3,1350
Staklena tkanina plošne mase 390 g/m ²	18	18,2	16,3	18,1	14,4	17	1,6508



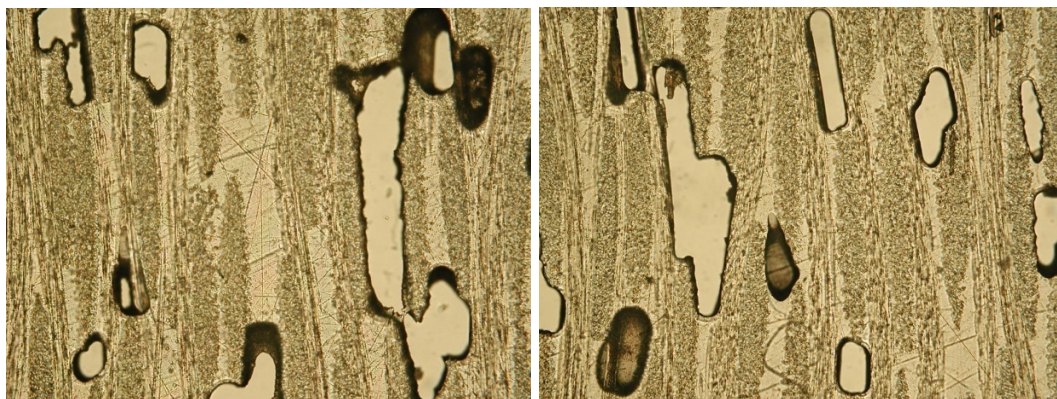
Slika 5.17. Dijagram ovisnosti udjela šupljina o plošnoj masi staklene tkanine



Slika 5.18. Mikroskopska snimka izbruska kompozita sa staklenom tkaninom plošne mase 80 g/m²



Slika 5.19. Mikroskopska snimka izbruska kompozita sa staklenom tkaninom plošne mase 163 g/m²



Slika 5.20. Mikroskopska snimka izbruska kompozita sa staklenom tkaninom plošne mase 390 g/m^2

Dobiveni rezultati pokazuju da je prosječni udio šupljina u kompozitu mnogo veći od uobičajenog za kompozit izrađen dodirnim postupkom laminiranja. Veliki udio šupljina može se pripisati nedostacima prilikom postupka izrade, pri čemu je najznačajnije pridonijela konstrukcija alata i činjenica da nije postojalo podtlačno otplinjavanje zaostalih mjehurića zraka. Konstrukcija alata osigurala je zarobljavanje mjehurića po sredini kompozitne ploče budući da se zarobljeni mjehurići zraka nisu imali prema kamo odzračiti. U pravilu kod ovakvog udjela šupljina u kompozitu mora se ponavljati postupak izrade zbog toga što je struktura značajno oslabljena. Budući da je udio šupljina u izrađenim kompozitima jednak, ispitivana mehanička svojstva su komparabilna.

5.5. Određivanje volumnog udjela vlakana u smjeru naprezanja

Kako bi se dobio detaljniji uvid u prenašanje opterećenja iz dobivenih masenih udjela vlakana i podataka proizvođača izračunati su volumni udjeli vlakana koja su se nalazila u smjeru naprezanja, odnosno u uzdužnom smjeru, za svaku od tri serije kompozita.

Najprije su se izračunali specifični volumeni smole, vlakana s pomoć jednadžbi 5.7 i 5.8. Zatim se zbrajanjem tih specifičnih volumena dobio specifični volumen kompozita. Za gustoću smole i vlakana preuzeti su podaci od proizvođača. Zatim se računa volumni udio vlakana prema jednadžbi 5.9. Oduzimanjem volumnog udjela vlakana od apsolutnog iznosa dobiva se volumni udio smole. Iz kataloga proizvođača za svaku od

plošnih masa staklenih tkanina preuzeti su podaci o broju snopova vlakana u uzdužnom i poprečnom smjeru preko kojih se određuje postotak vlakana u uzdužnom smjeru. Množenjem volumnog udjela vlakana u kompozitu s postotkom vlakana raspoređenih u smjeru opterećenja dobiva se volumni udio vlakana raspoređenih u smjeru opterećenja. Izračunati podaci nalaze se u tablici 5.14.

Specifični volumen smole računa se prema jednadžbi (5.7):

$$v_s = \frac{x_s}{\rho_s} \quad (5.7.)$$

Gdje su:

v_s - specifični volumen smole, cm³/g

x_s - maseni udio smole

ρ_s - gustoća smole, g/cm³

Specifični volumen vlakana računa se prema jednadžbi (5.8):

$$v_v = \frac{x_v}{\rho_v}, \text{ cm}^3/\text{g} \quad (5.8.)$$

Gdje su:

v_v - specifični volumen vlakana, cm³/g

x_v - maseni udio vlakana

ρ_v - gustoća vlakana, g/cm³

Volumni udio vlakana računa se prema jednadžbi (5.9):

$$u_v = \frac{v_v}{v_k} \cdot 100 \% \quad (5.9.)$$

Gdje su

u_v - volumni udio vlaka, %

v_v - specifični volumen vlakana, cm³/g

v_k - specifični volumen kompozita, cm³/g

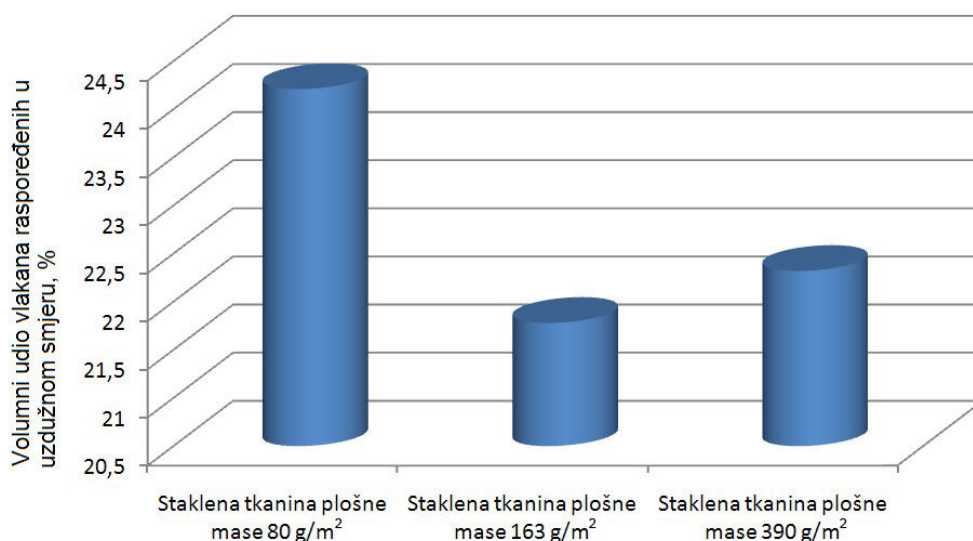
Tablica 5.14. Volumni udio vlakana raspoređenih u smjeru naprezanja [13], [14]

Plošna masa staklene tkanine, g/m ²	80	163	390
Maseni udio vlakana, %	68,26	63,88	64,87
Maseni udio smole, %	31,74	36,12	35,13
Gustoća smole, g/cm ³	1,135	1,135	1,135
Gustoća vlakana, g/cm ³	2,6	2,6	2,6
Specifični volumen smole, cm ³ /g	0,2796	0,3182	0,3095
Specifični volumen vlakana, cm ³ /g	0,2625	0,2457	0,2495
Specifični volumen kompozita, cm ³ /g	0,5422	0,5639	0,5590
Volumni udio vlakana, %	48,42	43,57	44,63
Volumni udio smole, %	51,58	56,43	55,37
Broj snopova vlakana u uzdužnom smjeru po 1 cm duljine	12	12	6
Broj snopova vlakana u poprečnom smjeru po 1 cm duljine	12	12	6,7
Postotak vlakana raspoređenih u uzdužnom smjeru, %	50	50	47,24
Volumni udio vlakana raspoređenih u uzdužnom smjeru, %	24,21	21,78	22,32

Na temelju izračunatih podataka konstruiran je dijagram ovisnosti volumnog udjela vlakana raspoređenih u uzdužnom smjeru prikazan na slici 5.21. Iz dijagrama je vidljivo da kompozit s staklenom tkaninom plošne mase 80 g/m² ima najveći volumni udio vlakana raspoređenih u uzdužnom smjeru. Slijede ga kompoziti s plošnom masom staklene tkanine 390 g/m² i 163 g/m².

Rezultati su očekivani budući da proizlaze iz već analiziranih masenih udjela staklenih vlakana u poglavlju 5.4.3. Staklena tkanina plošne mase 80 g/m² ima najveći volumni udio vlakana u uzdužnom smjeru zbog načina tkanja i finije strukture tkanine, sačinjene od snopova vlakana manjih promjera, kojima se postigla veća gustoća kompozita. Iako je kompozit s ovom tkaninom imao najveći udio vlakana u uzdužnom smjeru, nije mu

osigurao bolja mehanička svojstva, kao što to nije učinio ni veliki broj slojeva ojačavala. Ovo pokazuje da je presudnu ulogu u mehaničkim svojstvima imao način tkanja.



Slika 5.21. Dijagram ovisnosti volumnog udjela vlakana raspoređenih u uzdužnom smjeru

5.6. Rasprava

Provedena ispitivanja pokazala su da kompozit s najvećom plošnom masom staklene tkanine, odnosno najmanjim brojem slojeva, ima najbolja mehanička svojstva. Postoji nekoliko razloga koji objašnjavaju dobivene rezultate. Najvažniji razlog je način tkanja staklene tkanine. Kod dva kompozita s većom plošnom masom staklene tkanine ona je tkana keper vezom. Keper vezom postižu se bolja mehanička svojstva kompozita budući da se vlakna manje savijaju. Manje savijanje vlakana znači bolje prenašanje opterećenja, i manje zaostalih naprezanja usljed uklinjenja vlakana koja negativno utječu na mehanička svojstva. Drugi razlog je homogenost strukture kompozita. S manjim brojem slojeva staklene tkanine postigla se homogenija struktura, odnosno na manje mjesta postoje nedostaci vezani uz proizvodni postupak, odnosno vezanje slojeva tkanine i smole. Kod keper veza postiže se bolja impregnacija vlakana smolom zbog veće poroznosti tkanine, što je ponovno pridonijelo homogenosti i kompaktnosti strukture.

Kompozit s najmanjim brojem slojeva tkanine ima najveću prividnu međuslojnu smičnu čvrstoću. Razlog tome je što su snopovi vlakana većeg promjera nego kod druga dva kompozita. Ispreplitanjem ovih snopova u tkanini dobivaju se veće amplitude savijanja snopova čime se postiže mehanizam uklinjenja slojeva tkanine što objašnjava veću prividnu međuslojnu čvrstoću.

Nešto veći modul savitljivosti kompozita s najvećim brojem slojeva staklene tkanine upućuje na to da bi on trebao imati najbolja mehanička svojstva. Budući da je tkan običnim uzorkom tkanja kod kojeg su vlakna dosta savijena, i budući da ima mnogo slojeva staklene tkanine pri čemu je struktura manje homogena, ukupna svojstva su nešto slabija nego kod kompozita s najmanjim brojem slojeva.

Kompozit s 26 slojeva staklene tkanine ima najslabija mehanička svojstva od sva tri ispitana kompozita. Iako je kod njega staklena tkanina tkana keper vezom, ima manje homogenu strukturu od kompozita s najmanjim brojem slojeva tkanine.

Ispitivanje tvrdoće pokazalo je da tvrdoća pada s porastom broja slojeva staklene tkanine. Razlog je ponovno način tkanja staklene tkanine. Kod kompozita tkanih keper vezom vlakna su bolje propijena smolom, što znači da ti kompoziti imaju kompaktniju strukturu. Kompaktnija struktura osigurava bolje prenošenje opterećenja i veću tvrdoću. Najmanju tvrdoću ima kompozit s najvećim brojem slojeva staklene tkanine.

Kompozit s najvećim brojem slojeva staklene tkanine ima nešto veći udio staklenih vlakana zbog toga što se tkaninom tkanom običnim uzorkom mogu gušće posložiti vlakna. Obični uzorak tkanja osigurava bolje slaganje vlakana između slojeva zbog pravilne strukture tkanine. Budući da su snopovi vlakana manjih promjera, oni se naslanjaju jedan na drugi između slojeva pri čemu postoji manje smole između slojeva tkanine nego kod drugih kompozita. Kod kompozita s većim promjerom snopova vlakana i nepravilnijim uzorkom tkanja postoji više praznina između slojeva koje popunjava smola, pa je i udio vlakana manji. Iako kompozit s većim brojem slojeva tkanine ima najveći udio vlakana raspoređenih u smjeru opterećenja, on nema najbolja

mehanička svojstva što ponovno upućuje na činjenicu da je uzorak tkanja imao presudnu ulogu u određivanju mehaničkih svojstava.

Analizom snimaka strukture dobivenih s pomoć polarizacijskog mikroskopa pokazalo se da je prosječni udio šupljina u kompozitima mnogo veći od uobičajenog za kompozit izrađen dodirnim postupkom laminiranja. Veliki udio šupljina može se pripisati nedostacima prilikom postupka izrade, konstrukciji alata i činjenici da nije postojalo podtlačno otplinjavanje zaostalih mjehurića zraka. Kod visokih udjela šupljina u kompozitu mora se ponavljati postupak izrade zbog toga što je struktura značajno oslabljena. Konstrukcija alata trebala bi biti izmjenjena na način da se osigura dovoljno otplinjavanje mjehurića zraka, pri čemu bi se mogao koristiti podtlak.

6. ZAKLJUČAK

Kompozitni materijali i uz njih vezani postupci prerade sve se više razvijaju. Proizvodnja kompozita više nije ograničena na proizvodnju skupih materijala izvrsnih svojstava. Danas se postupci prerade nastoje sve više prilagoditi masovnoj proizvodnji. Masovna proizvodnja odgovara proizvodnji proizvoda široke potrošnje i industrijama poput automobilske. Od postupaka prerade najbolju budućnost imaju postupci sa visokim stupnjem automatizacije koji su pogodni masovnoj proizvodnji. Od kontinuiranih postupaka prerade to je pultrudiranje. Pultrudirani profili sve više će se primjenjivati u građevinarstvu. Kod cikličkih postupaka prerade injekcijsko prešanje ima najbolju budućnost. Kompozitni otpresci sve više će zamjenjivati plastomerne u automobilskoj industriji. Ostali postupci prerade poput namotavanja filamenata i mokrog laminiranja i dalje će se koristiti u jednakoj mjeri. Oni su nezamjenjivi kod dobivanja vrlo velikih i složenih oblika, željenih svojstava. Očekuju ih poboljšanja u smislu povišenja stupnja automatizacije, pri čemu bi se više koristili roboti.

Kompozitima se mogu postići jeftiniji konačni proizvodi, ali i uštede na masi proizvoda, te poboljšana svojstva. Propisi mnogih država nalažu sve veće korištenje tih materijala i zbog manjeg zagađenja okoliša, kao i mogućnosti recikliranja. Na primjer, veći udio kompozitnih materijala u automobilima znači manju masu automobila, a to znači i manju uporabu goriva i manje emisija štetnih plinova. Razvoj novih materijala potaknuo je i razvoj novih postupaka prerade kojima je moguće proizvesti kompleksnije oblike proizvoda. To znači više slobode u konstruiranju proizvoda, a kompleksniji proizvodi imaju veću šansu probiti se na sve zahtjevnijem tržištu.

U radu provedeno je ispitivanje mehaničkih svojstava kompozita s različitim plošnim masama staklene tkanine odnosno različitim brojem slojeva tkanine. Želio se utvrditi utjecaj broja slojeva tkanine, odnosno gustoće vlakana na mehanička svojstva kompozita. Iako bi se teoretski povećanjem broja slojeva trebala dobiti nešto bolja mehanička svojstva, ispitivanjem triju serija kompozita pokazalo se da kompozit s

najvećom plošnom masom staklene tkanine, odnosno najmanjim brojem slojeva, ima najbolja mehanička svojstva. Glavni razlog tome bio je način tkanja staklene tkanine.

Bolji uvid u utjecaj broja slojeva tkanine na mehanička svojstva dobio bi se usporedbom svojstava kompozita ojačanih istim tipom tkanja. Utjecaj vrste tkanja bio bi jednoznačno određen tek usporedbom kompozita s istim brojem slojeva ojačavala različitih tipova tkanja. Danas se na tržištu uglavnom nalaze tkanine većih plošnih masa tkane keper vezom i tkanine manjih plošnih masa tkane običnim uzorkom tkanja. Najbolji uvid u utjecaj broja slojeva tkanine na mehanička svojstva dobio bi se korištenjem jednosmjernih tkanina. Njima se mogu lakše postići odgovarajući udjeli vlakana i anizotropna svojstva. U nekom od sljedećih ispitivanja trebalo bi detaljnije proučiti utjecaj načina tkanja staklenih tkanina na mehanička svojstva kompozita.

7. LITERATURA

1. Filetin, T., Kovačiček, F., Indof, J.: Svojstva i primjena materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2007.
2. Akovali, G.: Handbook of Composite Fabrication, RAPRA Technology LTD., Shawbury, Shrewsbury, Shropshire, UK, 2001.
3. Biron, M.: Thermosets and Composites, Elsevier, Oxford, 2004.
4. Dave, R.S., Loos, A.C.: Processing of composites, Carl Hanser Verlag, Muenchen, 2000.
5. Reinforcing fibres and finishes;
http://www.gurit.com/core/core_picker/download.asp?documenttable=libraryfiles&id=449, 24.11.2008.
6. ASM Handbook, Volume 21 Composites, ASM International, 2001.
7. Unidirectional fabrics;
http://www.gurit.com/core/core_picker/download.asp?documenttable=libraryfiles&id=312; 24.11.2008.
8. 0/90° Fabrics;
http://www.gurit.com/core/core_picker/download.asp?documenttable=libraryfiles&id=313, 24.11.2008.
9. Multiaxial fabrics;
http://www.gurit.com/core/core_picker/download.asp?documenttable=libraryfiles&id=314, 24.11.2008.
10. Kausch, H. H.: Advanced Thermoplastic Composites, Carl Hanser Verlag, 1993.
11. Čatić, I., Johannaber, F.: Injekcijsko prešanje polimera i ostalih materijala, Društvo za plastiku i gumu, Zagreb, 2004.
12. Injection 17, Issue 2, Engel, Schwertberg, 2008.
13. Epoxydharz L1100;
http://www.ezentrumbilder.de/rg/pdf/td_de_Epoxydharz_L_1100.pdf, 26.11.2008.
14. R&G Flüssigkunststoffe, Catalogue 6, Waldenbuch
15. HRN EN ISO 14125:2005, Plastični kompoziti ojačani vlaknima – Određivanje svojstava

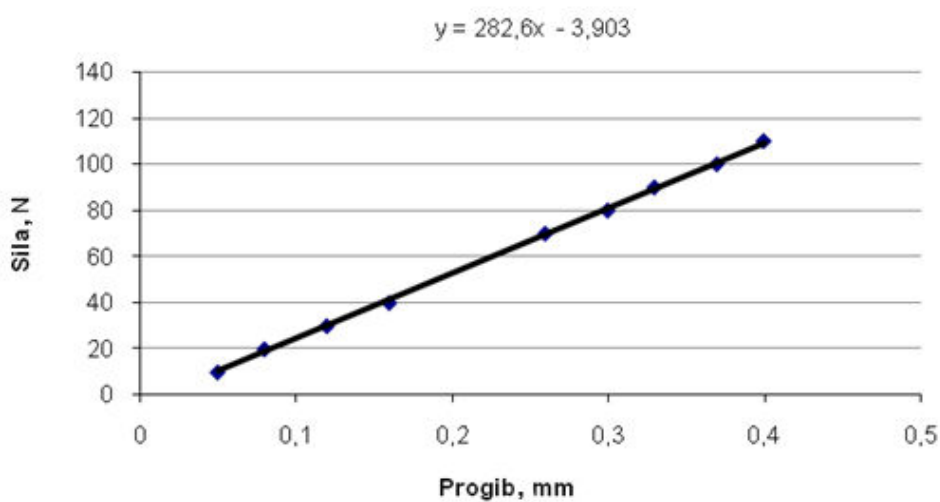
16. ISO 14130:1997, Fibre-reinforced plastic composites - Determination of apparent interlaminar shear strenght by short-beam method
17. Čatić, I. Čatić, R.: Englesko - hrvatski rječnik polimerstva, Društvo za plastiku i gumu, Zagreb, 2002.

8. PRILOG

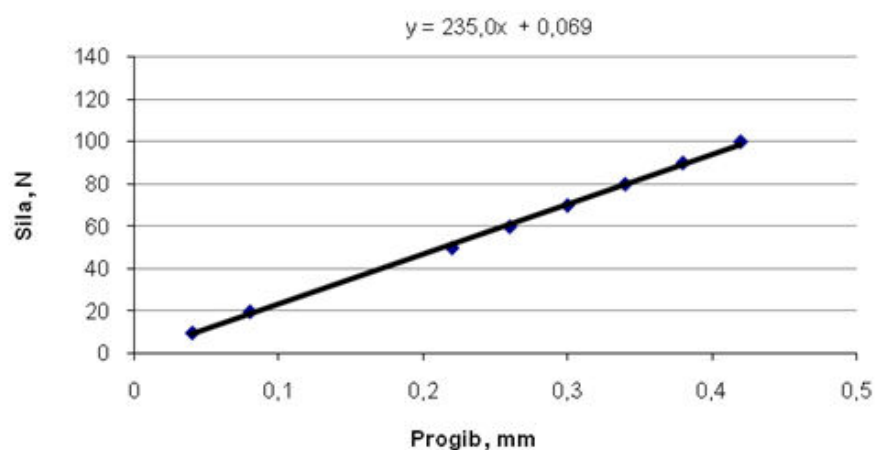
8.1. Rezultati mjerenja savojne čvrstoće i modula savitljivosti ispitnog tijela sa staklenom tkaninom plošne mase 80 g/m²

Tablica 8.1. Rezultati mjerenja progiba u ovisnosti promjene sile opterećenja

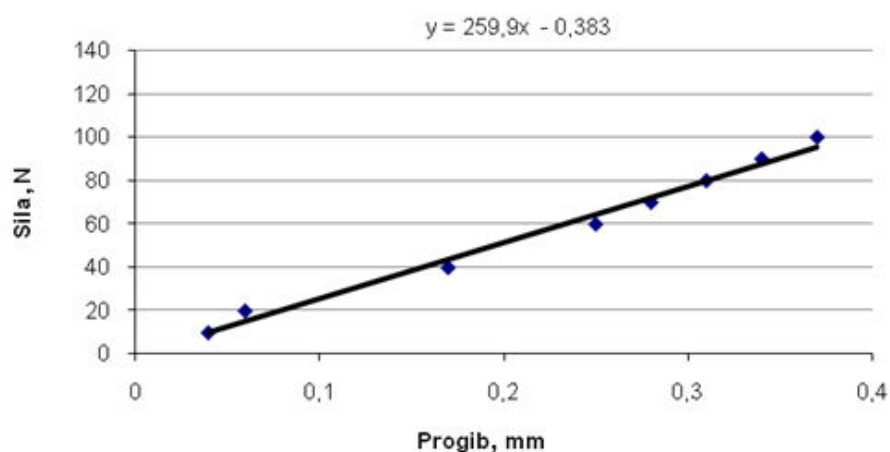
Opterećenje F , N	Redni broj	1	2	3	4	5
10	Progib f , mm	0,05	0,04	0,04	0,04	0,03
20		0,08	0,08	0,06	0,1	0,08
30		0,12	0,16	0,14	0,13	0,13
40		0,16	0,19	0,17	0,17	0,16
50		0,2	0,22	0,22	0,21	0,2
60		0,24	0,26	0,25	0,25	0,24
70		0,26	0,3	0,28	0,28	0,26
80		0,3	0,34	0,31	0,3	0,29
90		0,33	0,38	0,34	0,34	0,32
100		0,37	0,42	0,37	0,37	0,37
110		0,4				0,39



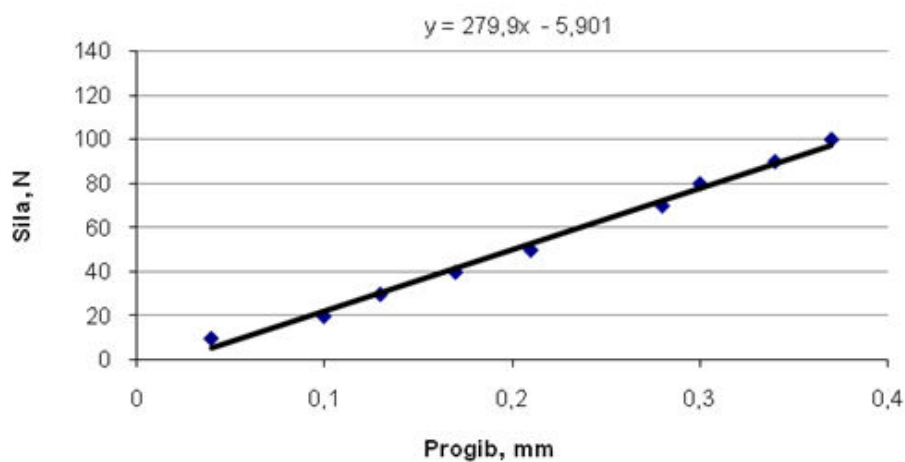
Slika 8.1. Dijagram ovisnosti progiba o opterećenju za prvo ispitno tijelo



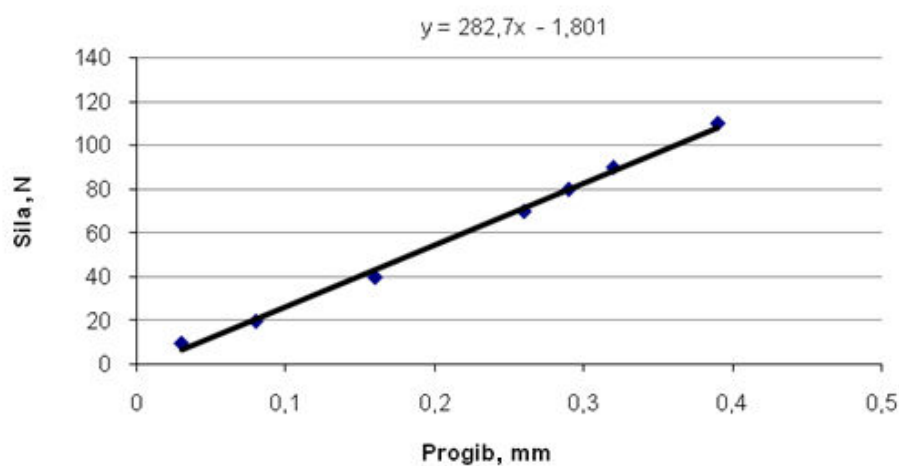
Slika 8.2. Dijagram ovisnosti progiba o opterećenju za drugo ispitno tijelo



Slika 8.3. Dijagram ovisnosti progiba o opterećenju za treće ispitno tijelo



Slika 8.4. Dijagram ovisnosti progiba o opterećenju za četvrto ispitno tijelo

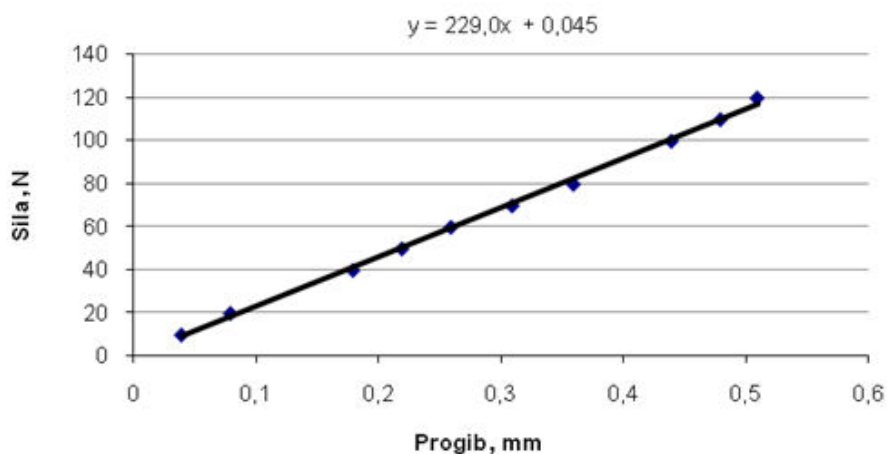


Slika 8.5. Dijagram ovisnosti progiba o opterećenju za peto ispitno tijelo

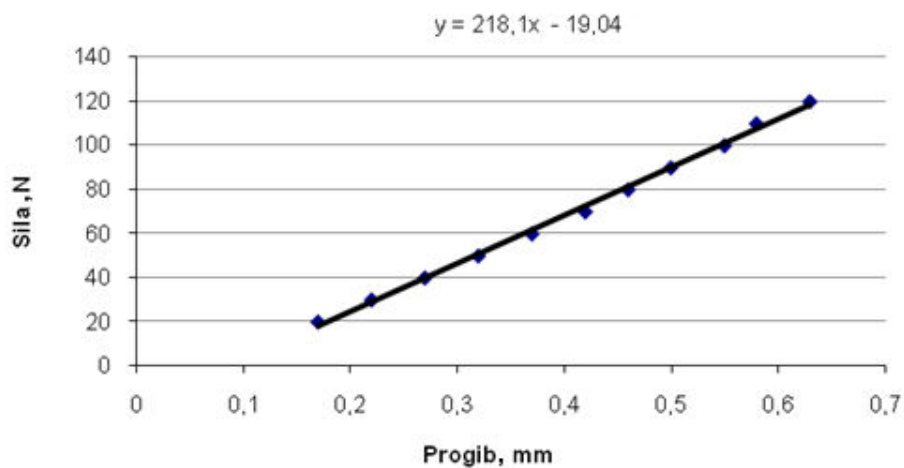
8.2. Rezultati mjerenja savojne čvrstoće i modula savitljivosti ispitnog tijela sa staklenom tkaninom plošne mase 163 g/m^2

Tablica 8.2. Rezultati mjerenja progiba u ovisnosti promjene sile opterećenja

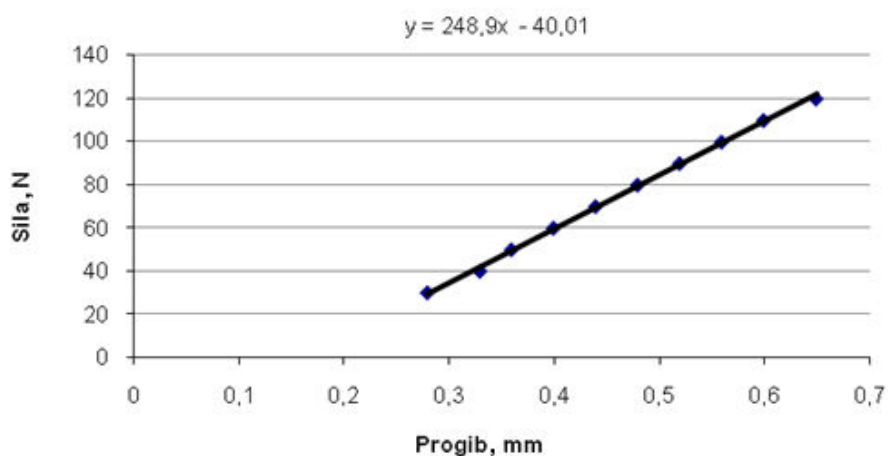
Opterećenje $F, \text{ N}$	Redni broj	1	2	3	4	5
10	Progib $f, \text{ mm}$	0,04	0,11	0,09	0,07	0,04
20		0,08	0,17	0,18	0,13	0,1
30		0,12	0,22	0,28	0,19	0,17
40		0,18	0,27	0,33	0,24	0,21
50		0,22	0,32	0,36	0,28	0,25
60		0,26	0,37	0,4	0,32	0,29
70		0,31	0,42	0,44	0,36	0,33
80		0,36	0,46	0,48	0,4	0,37
90		0,41	0,5	0,52	0,46	0,41
100		0,44	0,55	0,56	0,5	0,46
110		0,48	0,58	0,6	0,54	0,48
120		0,51	0,63	0,65	0,58	0,52



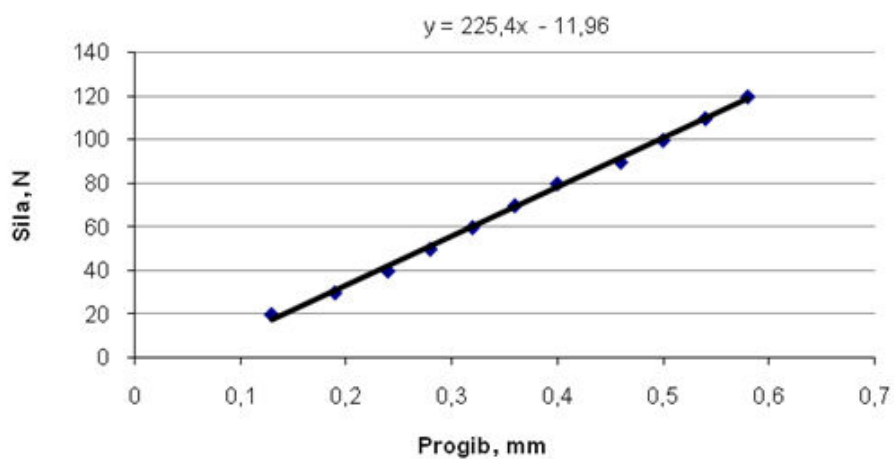
Slika 8.6. Dijagram ovisnosti progiba o opterećenju za prvo ispitno tijelo



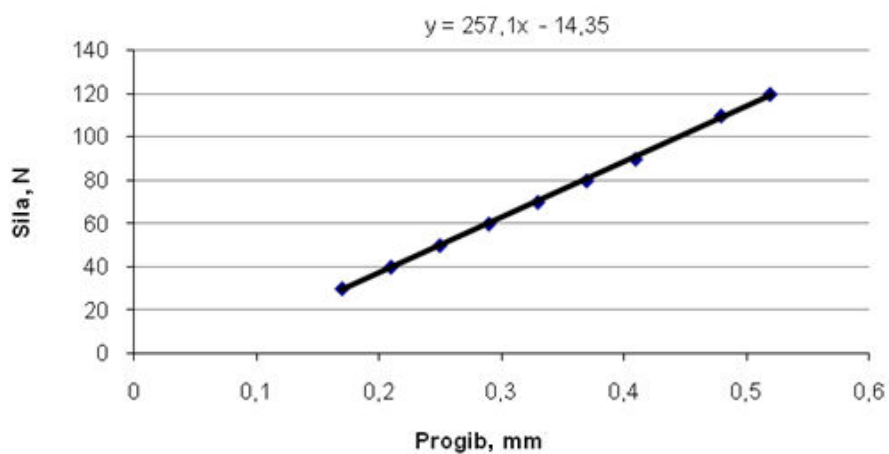
Slika 8.7. Dijagram ovisnosti progiba o opterećenju za drugo ispitno tijelo



Slika 8.8. Dijagram ovisnosti progiba o opterećenju za treće ispitno tijelo



Slika 8.9. Dijagram ovisnosti progiba o opterećenju za četvrto ispitno tijelo

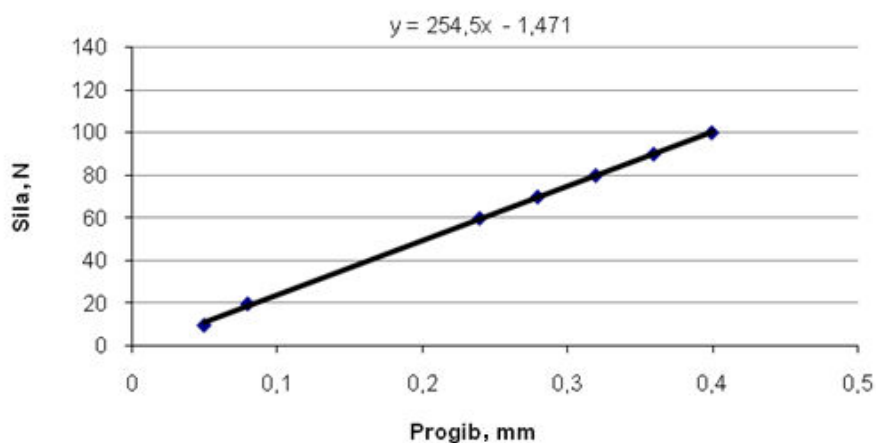


Slika 8.10. Dijagram ovisnosti progiba o opterećenju za peto ispitno tijelo

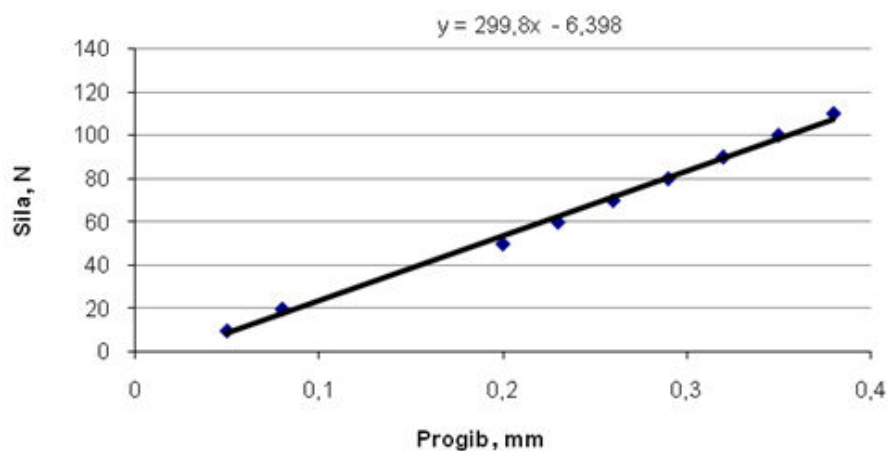
8.3. Rezultati mjerenja savojne čvrstoće i modula savitljivosti ispitnog tijela sa staklenom tkaninom plošne mase 390 g/m²

Tablica 8.3. Rezultati mjerenja progiba u ovisnosti promjene sile opterećenja

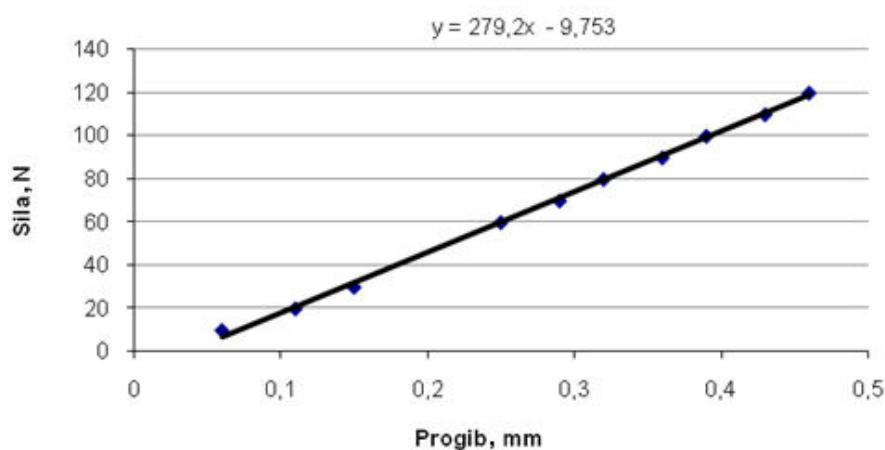
Opterećenje F , N	Redni broj	1	2	3	4	5
10	Progib f , mm	0,04	0,11	0,09	0,07	0,04
20		0,08	0,17	0,18	0,13	0,1
30		0,12	0,22	0,28	0,19	0,17
40		0,18	0,27	0,33	0,24	0,21
50		0,22	0,32	0,36	0,28	0,25
60		0,26	0,37	0,4	0,32	0,29
70		0,31	0,42	0,44	0,36	0,33
80		0,36	0,46	0,48	0,4	0,37
90		0,41	0,5	0,52	0,46	0,41
100		0,44	0,55	0,56	0,5	0,46
110		0,48	0,58	0,6	0,54	0,48
120		0,51	0,63	0,65	0,58	0,52



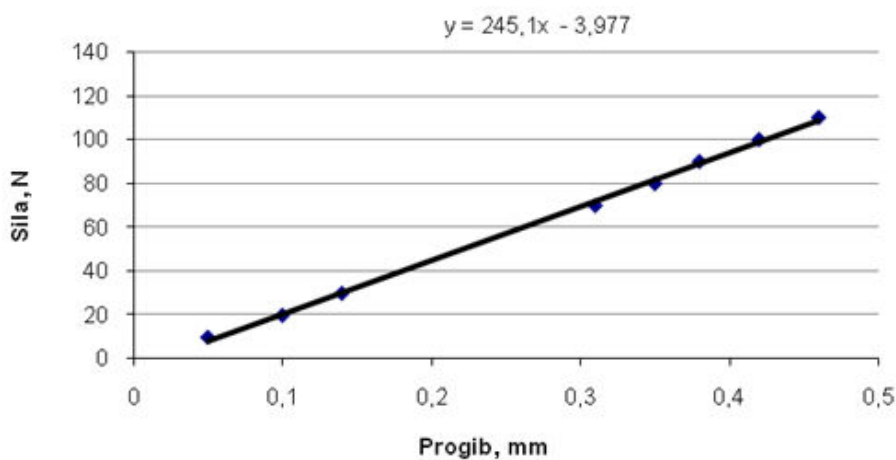
Slika 8.11. Dijagram ovisnosti progiba o opterećenju za prvo ispitno tijelo



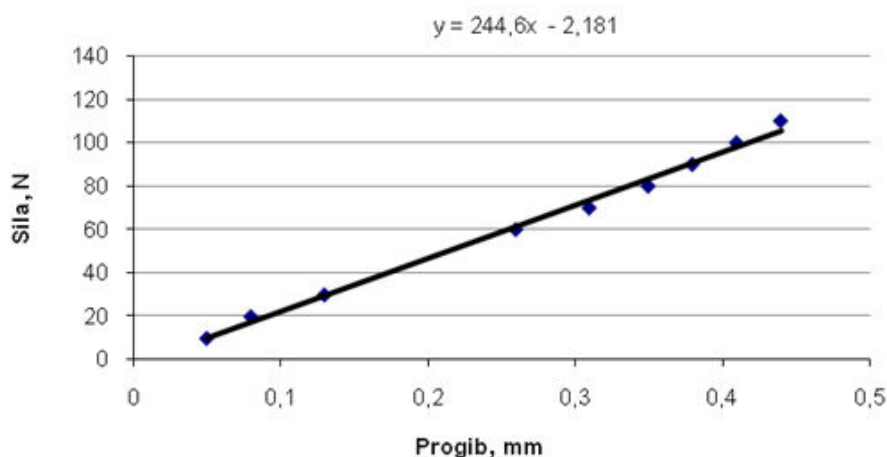
Slika 8.12. Dijagram ovisnosti progiba o opterećenju za drugo ispitno tijelo



Slika 8.13. Dijagram ovisnosti progiba o opterećenju za treće ispitno tijelo



Slika 8.14. Dijagram ovisnosti progiba o opterećenju za četvrto ispitno tijelo



Slika 8.15. Dijagram ovisnosti progiba o opterećenju za peto ispitno tijelo

8.4. Mjerenje tvrdoće metodom utiskivanja kuglice promjera 5 mm

Tablica 8.4. Tvrdoća u ovisnosti o vremenskom trajanju, kompozit sa staklenom tkaninom plošne mase 80 g/m²

R. br. mj.	Iznos prodora 10 s, mm	Korektura mm	Tvrdoća 10 s, N/mm ²	Iznos prodora 30 s, mm	Korektura mm	Tvrdoća 30 s, N/mm ²	Iznos prodora 60 s, mm	Korektura mm	Tvrdoća 60 s, N/mm ²
1	0,187	0,167	186,45	0,192	0,172	181,57	0,195	0,175	178,46
2	0,194	0,174	178,97	0,198	0,178	175,46	0,201	0,181	172,54
3	0,198	0,178	175,45	0,202	0,182	171,60	0,205	0,185	168,81
4	0,194	0,174	179,49	0,197	0,177	175,95	0,205	0,185	168,81
5	0,179	0,159	196,42	0,182	0,162	192,78	0,184	0,164	190,43
6	0,185	0,165	189,28	0,188	0,168	185,34	0,191	0,171	182,63
7	0,179	0,159	196,42	0,182	0,162	192,19	0,185	0,165	188,70
8	0,197	0,177	175,95	0,201	0,181	172,54	0,204	0,184	169,73
9	0,175	0,155	201,49	0,178	0,158	197,66	0,181	0,161	193,98
10	0,191	0,171	182,63	0,195	0,175	178,46	0,197	0,177	175,95
\bar{x}	0,188	0,168	186,258	0,191	0,171	182,359	0,194	0,174	179,010
S	0,0082	0,0082	9,326	0,0085	0,0085	9,220	0,0091	0,0091	9,470

Tablica 8.5. Tvrdća u ovisnosti o vremenskom trajanju, kompozit sa staklenom tkaninom plošne mase 163 g/m²

R. br. mj.	Iznos prodora 10 s, mm	Korektura mm	Tvrdća 10 s, N/mm ²	Iznos prodora 30 s, mm	Korektura mm	Tvrdća 30 s, N/mm ²	Iznos prodora 60 s, mm	Korektura mm	Tvrdća 60 s, N/mm ²
1	0,165	0,145	215,38	0,167	0,147	211,73	0,168	0,148	211,02
2	0,175	0,155	201,49	0,181	0,161	193,98	0,182	0,162	192,19
3	0,175	0,155	201,49	0,177	0,157	198,29	0,179	0,159	196,42
4	0,182	0,162	192,78	0,187	0,167	186,45	0,189	0,169	184,25
5	0,175	0,155	201,49	0,179	0,159	196,42	0,181	0,161	193,98
6	0,181	0,161	193,98	0,185	0,165	189,28	0,186	0,166	187,57
7	0,182	0,162	192,78	0,184	0,164	190,43	0,185	0,165	188,70
8	0,174	0,154	202,80	0,176	0,156	200,20	0,178	0,158	197,66
9	0,17	0,15	208,20	0,174	0,154	202,80	0,175	0,155	201,49
10	0,185	0,165	189,28	0,191	0,171	182,63	0,193	0,173	180,00
\bar{x}	0,176	0,156	199,970	0,1803	0,1603	195,224	0,181	0,161	193,332
S	0,0061	0,0061	7,9853	0,0069	0,0069	8,5686	0,0074	0,0074	8,9693

Tablica 8.6. Tvrdća u ovisnosti o vremenskom trajanju, kompozit sa staklenom tkaninom plošne mase 390 g/m²

R. br. mj.	Iznos prodora 10 s, mm	Korektura mm	Tvrdća 10 s, N/mm ²	Iznos prodora 30 s, mm	Korektura mm	Tvrdća 30 s, N/mm ²	Iznos prodora 60 s, mm	Korektura mm	Tvrdća 60 s, N/mm ²
1	0,162	0,142	219,93	0,165	0,145	215,38	0,166	0,146	213,91
2	0,155	0,135	231,34	0,159	0,139	224,68	0,160	0,140	222,28
3	0,158	0,138	226,31	0,161	0,141	221,49	0,162	0,142	219,16
4	0,16	0,14	223,08	0,162	0,142	219,16	0,164	0,144	216,88
5	0,164	0,144	216,88	0,166	0,146	213,91	0,169	0,149	209,60
6	0,167	0,147	211,73	0,172	0,152	205,46	0,174	0,154	202,14
7	0,153	0,133	233,94	0,156	0,136	229,64	0,159	0,139	224,68
8	0,16	0,14	223,08	0,162	0,142	219,93	0,1635	0,143	217,63
9	0,16	0,14	223,08	0,162	0,142	219,16	0,164	0,144	216,88
10	0,159	0,139	224,68	0,161	0,141	220,71	0,164	0,144	216,88
\bar{x}	0,159	0,139	223,408	0,162	0,142	218,957	0,164	0,144	216,008
S	0,0041	0,0041	6,4561	0,0043	0,0043	6,4781	0,0044	0,0044	6,3879